

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ARQUIVO DE DADOS TECNOLÓGICOS DE USINAGEM  
PARA A DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DE CONDIÇÕES  
DE CORTE EM TOROS COM COMANDO NUMÉRICO.

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

LUIZ AIRTON CONSALTER

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1985.

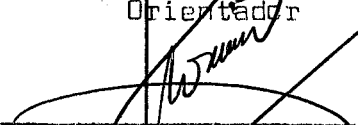
ARQUIVO DE DADOS TECNOLÓGICOS DE USINAGEM  
PARA A DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DE CONDIÇÕES  
DE CORTE EM TORNOS COM COMANDO NUMÉRICO

LUIZ AIRTON CONSALTER

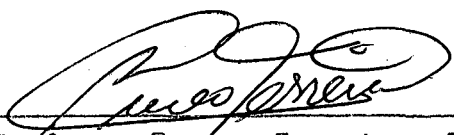

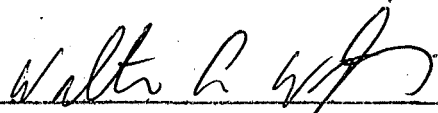
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE

"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA - ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO - E  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Áureo Campos Ferreira, Ph.D.  
Orientador  
\_\_\_\_\_  
Prof. Clovis Raimundo Maliska, Ph.D.  
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Áureo Campos Ferreira, Ph.D.  
Presidente  
\_\_\_\_\_  
Prof. Lourival Boehs, M.Sc.  
\_\_\_\_\_  
Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.

A Magda, minha esposa.

A Odila, minha mãe.

A memória de Pedro, meu pai.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Áureo Campos Ferreira, pela orientação e apoio prestados, direta e indiretamente ligados a este trabalho.

Ao Prof. Lourival Boehs, pela dedicada co-orientação e pelas várias sugestões apresentadas.

Ao Prof. Walter L. Weingaertner, pela criteriosa revisão e sugestões apresentadas.

Ao Prof. Arno Blass, pela confiança.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, que, pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e disponibilidade de equipamentos de seus laboratórios, possibilitaram a realização deste trabalho.

À Eletromotores WEG S.A., que, por intermédio do seu Centro de Pesquisas, forneceu o material dos corpos-de-prova para realização dos experimentos.

À Brown Boveri Co., pela disponibilidade de seus equipamentos e programas computacionais, bem como pelo apoio na utilização dos mesmos.

À Fundação do Ensino de Engenharia em Santa Catarina - FEESC, pela doação das ferramentas de corte.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da Bolsa de Estudos.

À Universidade de Caxias do Sul e à Faculdade de Engenharia de Joinville, pelas liberações para afastamentos temporários das funções, objetivando o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Grupo de Pesquisa e Treinamento em Comando Numérico - GRUCON, da UFSC, pelo auxílio na parte computacional deste trabalho; em especial aos Analistas de Sistemas Mauro Tautz, Ricardo J. Rabelo, Miriam C.C.F. Carneiro e ao aluno de Eng<sup>a</sup> Mecânica Adair Grigolo.

Ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - CPqD, da Indústria de Fundição Tupy S.A., e sua equipe de profissionais, pela contribuição na elaboração e apresentação deste trabalho; em especial ao Dr. Eng<sup>o</sup>. Adalberto Bierrenbach de Souza Santos, pelo apoio, e a Aux. Administrativo Beatriz Pereira, pela datilografia.

Aos técnicos, laboratoristas e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, pelos serviços prestados.

À minha esposa, pelo estímulo e compreensão.

Ao amigo Antonio Carlos Ribeiro Nogueira, pela incondicional hospitalidade.

Aos amigos Álisson Rocha Machado, Alexandre Dias da Silva, Américo Scotti, Antonio Eduardo Turra e Ednardo Bezerra de Andrade, pelo companheirismo.

## ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 - Sistema EXAPT 2 para determinação automática das condições de usinagem em operação de torneamento.....	3
2.2 - Arquivo de dados tecnológicos de usinagem (ADATU).....	5
2.2.1 - Usinabilidade.....	6
2.2.2 - Ensaios de usinabilidade.....	6
2.2.3 - Equação de vida de gume da ferramenta.....	7
2.2.4 - Preparação do ADATU.....	8
2.3 - Processo de confecção da peça - Determinação automática das condições de usinagem.....	9
2.3.1 - Programa da peça.....	9
2.3.2 - Determinação das condições de usinagem.....	10
3 - METODOLOGIA DE ENSAIO SISTEMÁTICO DE USINAGEM PARA GERAÇÃO DE DADOS DO ADATU.....	15
3.1 - Generalidades.....	15
3.2 - Corpo-de-prova.....	16
3.3 - Ferramenta de corte.....	17
3.4 - Condições de usinagem.....	20
3.5 - Critérios de fim de vida de gume.....	22
3.6 - Força específica de corte.....	24
3.7 - Fluido de corte.....	27
3.8 - Equipamentos.....	27
3.9 - Procedimento de ensaio.....	28
3.10- Processamento dos resultados.....	30
4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	31

4.1 - Equipamentos.....	31
4.1.1 - Equipamentos usados no ensaio de vida de gume.....	31
4.1.2 - Equipamentos usados para caracterização do material.....	33
4.1.3 - Equipamentos usados nas aferições.....	33
4.1.4 - Equipamentos usados no teste de funcionamento do ADATU....	34
4.2 - Aferições.....	35
4.2.1 - Aferição do sistema de acionamento de avanços da máquina - ferramenta.....	35
4.2.2 - Aferição do sistema de acionamento de profundidades de cor- te da máquina-ferramenta.....	37
4.2.3 - Aferição do sistema de medição de rotações da máquina-fer- ramenta.....	37
4.2.4 - Aferição do sistema de medição das componentes da força de usinagem.....	40
4.3 - Material dos corpos-de-prova.....	41
4.3.1 - Composição química.....	43
4.3.2 - Análise metalográfica.....	43
4.3.3 - Ensaio de dureza.....	45
4.3.4 - Resistência mecânica.....	46
4.4 - Métodos e resultados parciais.....	46
4.4.1 - Preparação do ensaio de vida de gume.....	46
4.4.2 - Ensaio de vida de gume.....	48
4.4.3 - Ensaio para determinação da força específica de corte ( $k_{cl.1}$ ) e expoente ( $1-m_c$ ) da equação de Kienzle.....	58
4.4.4 - Teste de funcionamento do ADATU na determinação automática de condições de usinagem para tornos com Comando Numérico.	61
5 - ANÁLISE/DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	68
5.1 - Considerações iniciais.....	68
5.2 - Determinação das profundidades de corte.....	68
5.3 - Determinação dos avanços.....	70
5.4 - Determinação das velocidades de corte.....	73
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.....	76
6.1 - Conclusões.....	76

6.2 - Sugestões para trabalhos posteriores.....	77
BIBLIOGRAFIA.....	78
APÊNDICE I.....	81
APÊNDICE II.....	89
APÊNDICE III.....	98
APÊNDICE IV.....	117



## RESUMO

Este trabalho trata da implantação de um arquivo de dados tecnológicos de usinagem voltado para materiais nacionais, e aplicado no processamento tecnológico de condições de corte em operação de torneamento com Comando Numérico. Para isso, é utilizado o sistema de programação EXAPT 2, capaz de fazer cálculos relacionados com a usinabilidade dos materiais de peças.

Uma metodologia de ensaio sistemático de usinagem é elaborada para geração dos dados do arquivo.

Utilizando as especificações desta metodologia, são realizados ensaios de usinagem com ferro fundido cinzento ABNT-FC100 e ferramenta de metal duro ABNT-K10. Os resultados, após processados, são armazenados de forma organizada e compacta que, juntamente com informações adicionais, compõem o arquivo de dados tecnológicos de usinagem.

Os dados arquivados são solicitados no processamento de um programa computacional para confecção automatizada de uma peça, sendo assim analisada e avaliada a implantação do referido arquivo.

# ABSTRACT

This work deals with the implantation of a technological machining data file for brazilian materials. The file is applied in the technological determination of cutting conditions for NC turning operations . For this purpose the EXAPT 2 system of programation is used, which is able to make calculations related with the machinability of part materials.

A systematic methodology of machining tests is worked up to beget data for the file.

The specifications of this methodology are adopted in machining tests by cutting gray cast iron (grade ABNT-FC 100) with carbide tools (grade ABNT - K10). The results of the tests are stored with informations in a compact form whose outcome is a technological machining data file.

The implantation of the file is analyzed and evaluated. For this purpose a computer program, that requires data stored in the file, is elaborated in order to turning a part automatically.

## 1 - INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica no setor de usinagem de metais, transcorrida desde o início do século e, apoiada por descobertas científicas com aprimoramentos técnicos em áreas correlatas desde a Segunda Guerra Mundial, vem sendo constantemente captada no setor industrial. Desta forma, já nos anos 60, a indústria podia usufruir das vantagens das máquinas-ferramentas controladas numericamente. Na década de 70, com o apoio do computador à técnica de comando numérico (NC) de máquinas-ferramentas, foram conseguidas várias melhorias para este setor da indústria mecânica, chegando-se a automatização dos processos de usinagem e de produção (1).

Para que esta automatização atinja seu objetivo de elevado grau de produtividade com qualidade e flexibilidade, torna-se indispensável o aproveitamento integral de suas potencialidades o que nem sempre é tão fácil de ser atingido, mesmo nos países mais desenvolvidos. No Brasil, de uma maneira geral, as limitações neste sentido ocorrem, principalmente, devido a três fatores (2):

- a) os ensaios para obtenção das condições ótimas de usinagem exigem tempo e despesas elevadas;
- b) não há muitos técnicos com informações seguras para definir corretamente as condições de usinagem;
- c) há dificuldades criadas no planejamento de usinagem, devido ao desenvolvimento no campo dos materiais das peças e materiais das ferramentas.

Adquire, portanto, importância fundamental a criação de um banco de dados de usinagem onde são armazenados os dados de usinagem provenientes de ensaios com materiais de peças, materiais de ferramentas e máquinas-ferramentas nacionais, utilizando uma metodologia padronizada. A partir de dados dispostos numa forma compacta, cria-se um arquivo de dados tecnológicos para determinação automática das condições de usinagem para máquinas NC.

A Universidade Federal de Santa Catarina, aproveitando o acordo de Cooperação Técnica firmado com a República Federal da Alemanha, que já possui um arquivo de dados tecnológicos de usinagem em pleno funcionamento, adquiriu base para o desenvolvimento deste trabalho de implantação de um arquivo de dados tecnológicos de usinagem voltado especifica-

mente para materiais de peças, materiais de ferramentas e máquinas-ferramentas em uso no país. Este arquivo vem permitir, a nível nacional, como parte integrante do Centro de Informações de Usinagem-CINFUS (2), a determinação automática das condições de usinagem para usuários do sistema EXAPT 2 para a programação de máquinas NC. O arquivo ganha importância e qualificação a medida que aumenta o número de dados disponíveis. Portanto, é primordial que as diversas instituições capazes de efetuar ensaios de usinagem, participem no "preenchimento dos espaços" do arquivo. Assim sendo, este trabalho, desenvolvido para um material específico (ABNT-FC 100), procura dar condições para que a obtenção de dados possa ser feita em diferentes instituições, para diversos pares de materiais de peças e de ferramentas.

Espera-se que com o uso do arquivo de dados tecnológicos de usinagem possam ser racionalizados, técnica e economicamente, os processos de usinagem, particularmente, em operações de torneamento.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - Sistema EXAPT 2 para determinação automática das condições de usinagem em operações de torneamento

Por volta de 1965 iniciava-se, na Alemanha o desenvolvimento da programação EXAPT para máquinas-ferramentas com comando numérico (NC), impulsionado pela união de esforços de institutos de pesquisas tecnológicas e indústrias para resolver problemas de usinagem (3).

Dos estudos e pesquisas desenvolvidos, e com auxílio do computador, resultou um sistema de programação automatizado para operações de torneamento denominado EXAPT 2, que possibilitou entre outras características funcionais (4), a determinação automática das condições de usinagem na fabricação de peças em tornos NC.

Na elaboração do programa de confecção de uma peça por torneamento em linguagem EXAPT 2, são incluídas apenas as informações dependentes da peça, ou seja, aquelas que variam de peça para peça. Tal programa é submetido ao processador EXAPT 2, que é dividido em processador geométrico e processador tecnológico (figura 1).

O processador geométrico identifica e codifica no programa principal as instruções que representam informações de entrada para o processador tecnológico. Este, processa as definições tecnológicas do programa principal, faz a descrição dos contornos da peça bruta e acabada, executa testes para verificar se há algum problema de colisão, faz a distribuição do corte e determina as condições de trabalho. Assim sendo, a forma de execução da peça se processa de maneira automática e otimizada. Para tal, o processador tecnológico necessita de dados que reflitam as propriedades do material da peça, do material da ferramenta, as condições de uso da ferramenta e as características da máquina-ferramenta bem como o comportamento da combinação material da peça/material da ferramenta/máquina-ferramenta. Tais dados encontram-se armazenados em arquivos, aos quais o processador tecnológico tem acesso (figura 1).

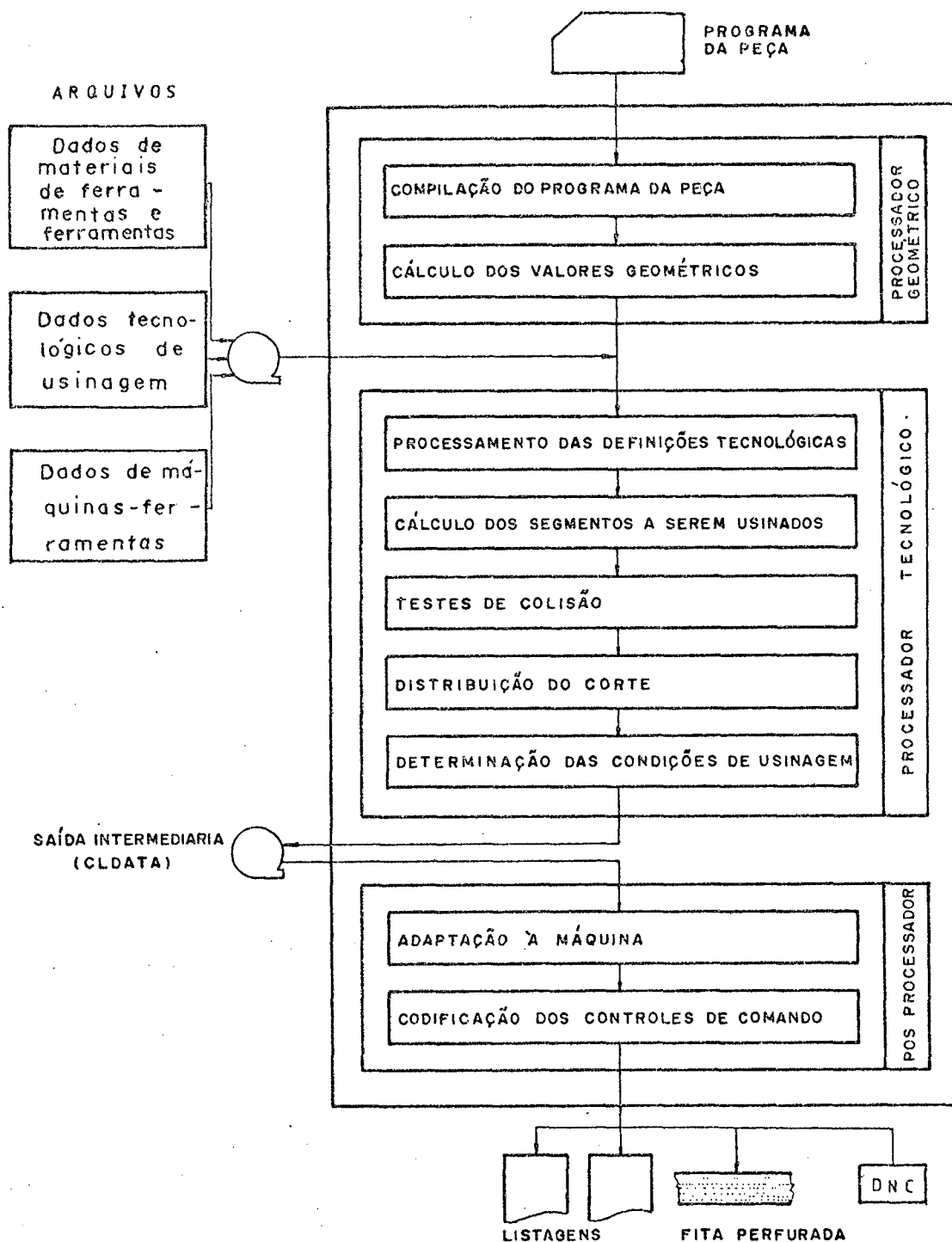


FIG. 1 - Esquema do processamento de um programa da peça, em EXAPT 2.

O arquivo de dados de máquinas-ferramentas possui os dados que possibilitam, do ponto de vista de operações, a melhor utilização possível da máquina em questão. Estes dados referem-se a informações sobre o acionamento principal da árvore, fator de correção para o cálculo do avan

ço, todas as rotações disponíveis em cada faixa de rotações, seus valores extremos e característicos, bem como os respectivos valores de torques, além de informações sobre o acionamento do avanço (5).

O arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas contém os dados exigidos para a distribuição do corte, determinação da trajetória do corte, testes de verificação de colisão, e determinação das condições de usinagem (6). O conjunto de dados do arquivo é constituído por informações sobre o material, condições de aplicação e geometria da pastilha, posicionamentos do gume de corte e do porta-pastilha, além de dados gerais (7).

O arquivo de dados tecnológicos de usinagem contém dados exigidos para a determinação das condições de usinagem considerando o par material da peça/material da ferramenta (8). Este arquivo será descrito a seguir, em maiores detalhes.

Uma vez executado o programa de processamento tecnológico, tem-se o procedimento automático para fabricação da peça. Um programa de adaptação dos resultados à máquina NC (pós-processador) é, então, usado para que as informações possam ser devidamente codificadas para posterior introdução na máquina-ferramenta através de fita perfurada, DNC\* ou manualmente (MDI\*\*).

Os comandos da máquina NC "obedecem" as informações introduzidas, e a peça, apropriadamente fixada à máquina, é confeccionada praticamente sem interferência direta do operador.

## 2.2 - Arquivo de dados tecnológicos de usinagem (ADATU)

Na determinação automática das condições de usinagem para operações de torneamento, o processador EXAPT considera as características do material da peça e do material da ferramenta, bem como as condições de operação da ferramenta e as características da máquina-ferramenta (9).

Como o mesmo material de uma determinada peça pode ser usado com diferentes materiais de ferramentas, é necessário determinar os

---

\* - DNC: Direct Numerical Control (Comando Numérico Direto ou Distribuído)

\*\* - MDI: Manual Data Input (Entrada Manual de Dados)

valores característicos do material da peça em relação aos materiais das ferramentas usados nas operações de usinagem (9).

O ADATU consiste em agrupamentos sistematizados de dados que representam as características de materiais quando submetidos ao corte com ferramentas específicas.

Os dados contidos no ADATU podem ser obtidos a partir de ensaios de usinabilidade, extraídos de literaturas de fabricantes de materiais e de ferramentas, ou com base na experiência adquirida na usinagem de metais por usuários de máquinas-ferramentas. Entretanto, é mais significativo utilizar os dados obtidos em ensaios sistemáticos de longa duração, específicos para cada par material da peça/material da ferramenta. Contribuem, primordialmente, para esta preferência, o fato dos ensaios serem direcionados para o fornecimento de dados ao ADATU (portanto, com metodologia pré-estabelecida), a variação nas características metalúrgicas e mecânicas de materiais similares fabricados em países diferentes, e o contínuo avanço tecnológico no campo de materiais de peças e de ferramentas.

O ADATU não se restringe apenas a dar assessoria ao processador tecnológico, mas também pode ser usado para o fornecimento de condições de corte à usinagem convencional, sob a forma de tabelas e gráficos.

### 2.2.1 - Usinabilidade

A usinabilidade pode ser definida como sendo o comportamento de determinado material quando submetido a conformação com remoção de cavacos (10).

A avaliação da usinabilidade pode ser feita através de grandezas inerentes ao processo de usinagem dos metais, tais como desgaste da ferramenta, força de usinagem, acabamento superficial da peça, temperatura de corte, produtividade e forma do cavaco (11).

O desgaste (vida) de gume da ferramenta é, geralmente, considerada como o critério mais importante de avaliação da usinabilidade (12).

### 2.2.2 - Ensaio de usinabilidade

Com base na afirmação de Field (12), constata-se que os ensaios de usinabilidade devem ser realizados objetivando a determinação da



vida de gume da ferramenta até que a evolução do desgaste atinja um critério pré-estabelecido para fim de uso do mesmo (ensaios de vida de gume da ferramenta).

Maiores detalhes sobre a realização dos ensaios de vida de gume estão apresentados no capítulo 3.

### 2.2.3 - Equação de vida de gume da ferramenta

Denomina-se vida de gume duma ferramenta o tempo que o mesmo efetivamente trabalha até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido (11).

Em uma operação de usinagem, o desgaste da ferramenta de corte é influenciado, em parte por fatores não integralmente conhecidos. No entanto, pode ser descrito, aproximadamente, em função das condições de usinagem; portanto, a interdependência entre desgaste e condições de usinagem deve ser levantada (3).

A equação que atualmente melhor representa tal relação é conhecida como equação de Taylor expandida (13), representada por:

$$v_c = V_{\text{STAND}} \cdot f^{\text{ECONST}} \cdot a_p^{\text{FCONST}} \cdot T^{\text{GCONST}} \cdot VB^{\text{HCONST}} \quad (1)$$

onde:

$v_c$  = velocidade de corte, m/min

$f$  = avanço, mm/rot

$a_p$  = profundidade de corte, mm

$T$  = vida de gume da ferramenta, min

$VB$  = desgaste da ferramenta, mm

$V_{\text{STAND}}$  = constante

ECONST	} expoentes
FCONST	
GCONST	
HCONST	

Na equação acima, cada expoente pondera os fatores indicados a que estão ligados, em relação às suas influências na velocidade de corte (9).

## 2.2.4 - Preparação do arquivo de dados tecnológicos de usinagem

A preparação do ADATU, conforme o esquema da figura 2, tem início com a realização de um ensaio de vida de gume para determinada combinação material da peça / material da ferramenta, de onde são obtidos dados referentes à esta combinação em operação. Tais dados, armazenados em formato adequado (8), são utilizados na determinação da constante e dos expoentes da equação de Taylor expandida através de um programa gerador de dados do ADATU (14).

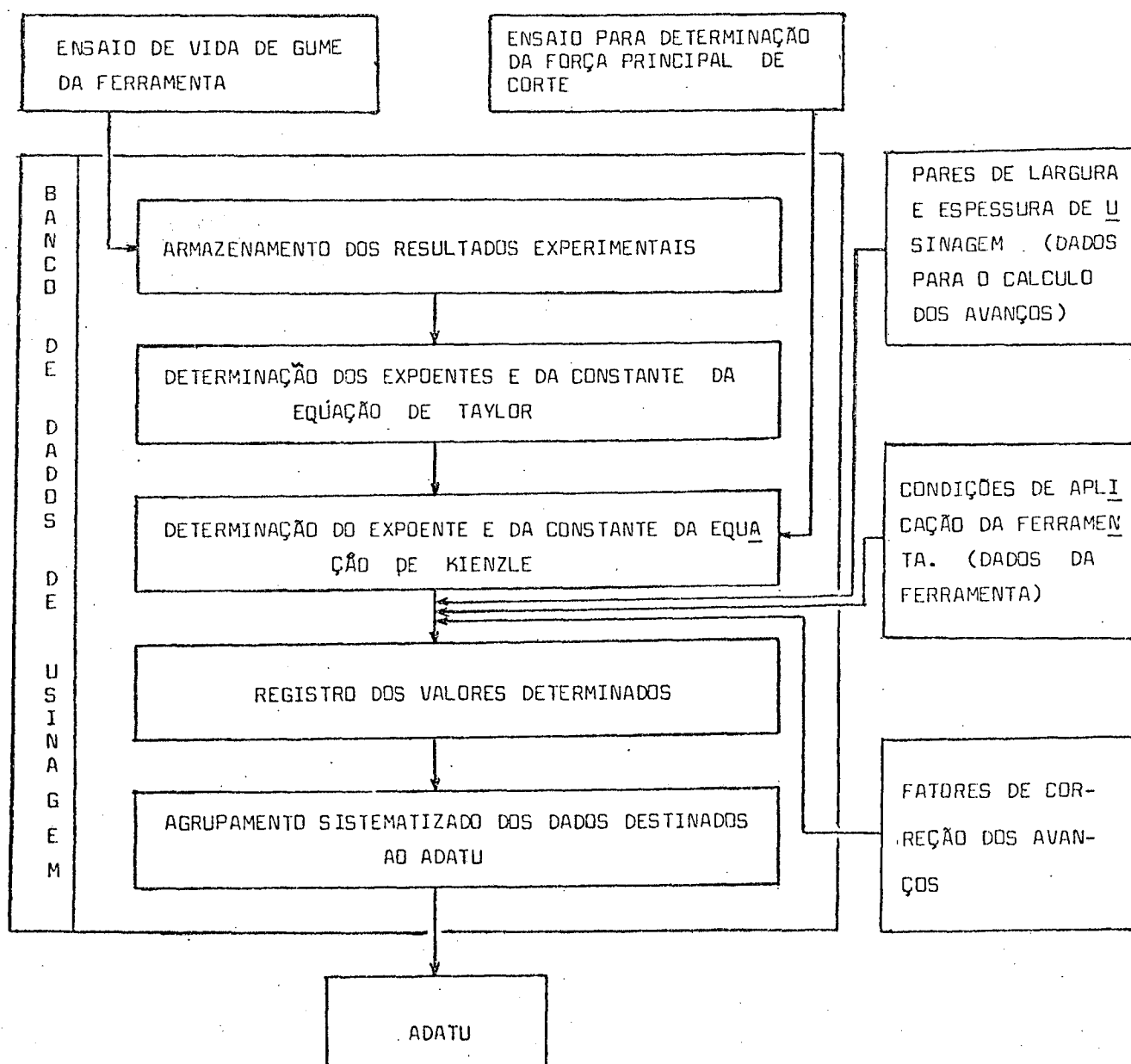


FIG. 2 - Esquema da preparação do ADATU.

De um segundo ensaio são obtidos valores medidos da força principal de corte que são usados na determinação da força específica de corte e do expoente da equação de Kienzle (ver ítem 3.6).

Os seguintes dados fazem parte da preparação do ADATU, além daqueles obtidos nos ensaios:

- pares de largura e espessura de usinagem, criteriosamente selecionados em função da forma do cavaco (ver ítems 2.3.2 e 3.4);
- condições de aplicação da ferramenta, em função de seu material e da forma do cavaco em operações de desbaste;
- fatores de correção para o cálculo do avanço (ver ítem 2.3.2).

O registro dos valores determinados é feito, em computador, de acordo com o formato e estrutura pré-estabelecidos (9), constituindo - se, assim, no conjunto de dados de entrada do programa-rotina de gerenciamento dos dados do ADATU (16), que faz o agrupamento sistemático destes dados e posterior armazenamento no arquivo, sendo que os vários agrupamentos formam o ADATU.

## 2.3 - Processo de confecção da peça - Determinação automática das condições de usinagem

### 2.3.1 - Programa da peça

O conjunto de declarações que descreve a peça de forma geométrica e tecnológica, e a organização do trabalho de confecção constituem o programa da peça.

As declarações do programa contém, ou constituem, especificações referentes ao processo de confecção da peça. Tais especificações representam as informações de entrada do programa, e são as seguintes(6):

- descrição da peça bruta;
- descrição da peça acabada, incluindo dados tecnológicos sobre a superfície da peça a ser usinada;
- definições tecnológicas (tipos de usinagem, parâmetros de usinagem, etc);
- descrição do modo e da posição de fixação;

- delimitação da região a ser usinada;
- dados tecnológicos adicionais.

Como resultado do programa da peça, obtém-se os percursos da ferramenta, profundidades de corte, avanços e velocidades de corte.

No apêndice I encontra-se um exemplo típico de programa de confecção de peça em EXAPT 2.

### 2.3.2 - Determinação das condições de usinagem

A determinação dos valores de profundidade de corte, avanço e velocidade de corte é realizada pelo processador tecnológico. Portanto, no programa da peça deverão estar especificados os componentes da operação, quais sejam, o material da peça, material da ferramenta e a máquina-ferramenta, bem como as descrições de contorno da peça bruta e acabada. Com isso, o processador tecnológico estará em condições de utilizar os referidos componentes da operação contidos em arquivos, e receber do processador geométrico a delimitação da área de material a ser removido.

A largura de corte,  $b$  (figura 3), é utilizada como base de cálculo. Os passes de corte são distribuídos, dentro da região de material a ser removido, utilizando-se a maior largura de corte permissível, afim de minimizar o número de passes de corte. O valor da largura de corte pode ser limitado pela profundidade de corte programada, pelo comprimento do gume ou pela quantidade de material a ser removido.

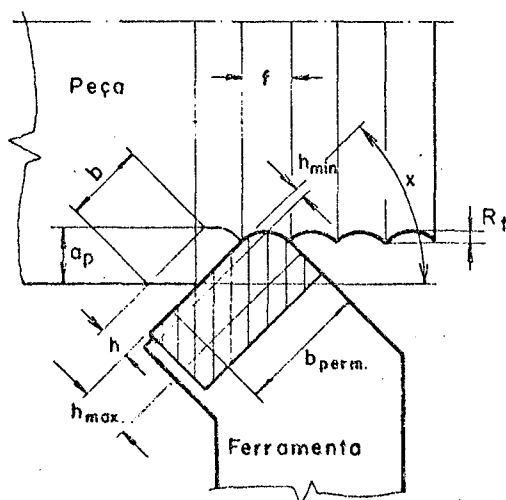


FIG. 3 - Geometria de corte.

Com o valor do ângulo de posição do gume principal da ferramenta,  $\chi$ , e os valores de  $b$ , obtidos pela distribuição dos passes de corte, a determinação da profundidade de corte,  $a_p$ , é feita pela seguinte relação geométrica:

$$a_p = b \cdot \sin \chi \quad (2)$$

Para o cálculo do avanço, em operações de desbaste, é utilizado o critério de forma do cavaco, de maneira que para cada valor de largura de corte existirá um valor correspondente de espessura de cavaco antes de ser removido,  $h$ , determinado pela seguinte equação (8):

$$h = HMAX \cdot \left( 1 - \frac{BMINUS}{BMINUS + b} \right) \quad (3)$$

Esta equação representa uma hipérbole (figura 4), cujas constantes  $HMAX$  e  $BMINUS$  são determinadas a partir de valores de  $b$  e  $h$  previamente selecionados (em função da forma do cavaco) e armazenados no ADATU.

Entretanto, os valores de  $b$  e  $h$  podem sofrer limitações em função das condições de utilização da máquina-ferramenta e do material da ferramenta de corte.

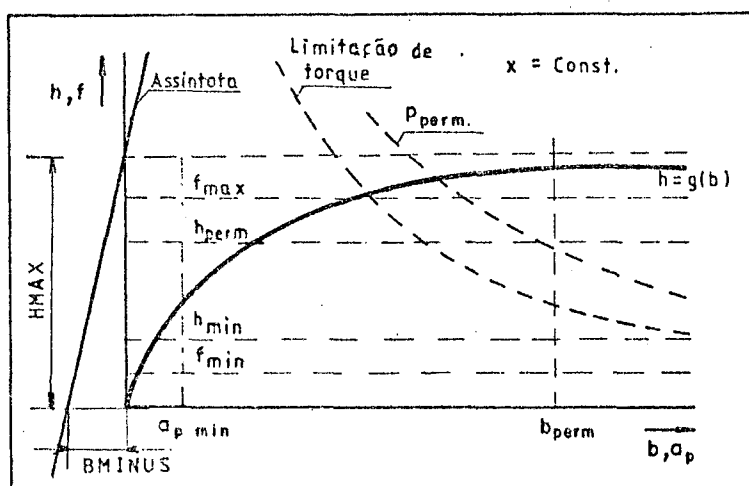


FIG. 4 - Gráfico representativo da determinação do avanço utilizando o critério de forma do cavaco.

Com os valores de  $h$  determinados, podem ser calculados os avanços correspondentes, através da relação geométrica.

$$f = \frac{h}{(\sin x)^{RKAPK}} \quad (4)$$

para  $x \leq 90^\circ$ . O fator  $RKAPK$ , da equação acima, é utilizado para correção do avanço devido ao aumento da força passiva (ver item 3.6) para  $x \leq 90^\circ$ . O valor de  $RKAPK = 0,5$  é, frequentemente, utilizado em processos industriais (8); tal fator pode, também, ser determinado a partir de ensaios experimentais e tratamento matemático (8,14). Com a mesma finalidade da equação 4, porém para  $x > 90^\circ$ , é usada a seguinte equação empírica (8):

$$f = h \cdot \sin^3 x \quad (5)$$

Para o cálculo do avanço em operações de acabamento é utilizada a seguinte equação (8,15):

$$f = \sqrt{B \cdot r_e \cdot R_t \cdot FINK \cdot FINMAQ} \quad (6)$$

Onde:

$r_e$  = raio da ponta da ferramenta, mm

$R_t$  = rugosidade em mm, segundo norma DIN 3141: 63  $\mu$ m para desbaste; 16  $\mu$ m para acabamento; 4  $\mu$ m para acabamento fino

FINK = fator de correção para o avanço em função do material

FINMAQ = fator de correção do avanço em função da máquina.

Os valores de avanço calculados são, então, verificados quanto aos seus limites de utilização. Se necessário, novos valores são determinados ou são usados fatores de correção (15,9).

Com os valores de profundidade de corte e avanço já determinados, a velocidade de corte é calculada pela equação de vida de gume da ferramenta (equação 1). Os demais parâmetros da equação 1, previamente determinados, são extraídos do ADATU (as constantes VSTAND, ECONST, FCONST, GCONST e HCONST são obtidas através do programa gerador de dados do ADATU) e do arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas (os valores de  $T$  e  $VB$  são escolhidos, respectivamente, a partir do campo de validação da equação de vida de gume e pelo critério de desgaste utilizado no en-

saio de vida de gume).

A velocidade de corte calculada pode sofrer, como o avanço e a profundidade de corte, limitações em função das condições de utilização da ferramenta, máquina-ferramenta e campo de validade da curva de vida de gume da ferramenta.

A figura 5 ilustra o comportamento da velocidade de corte em função do avanço e da profundidade de corte.

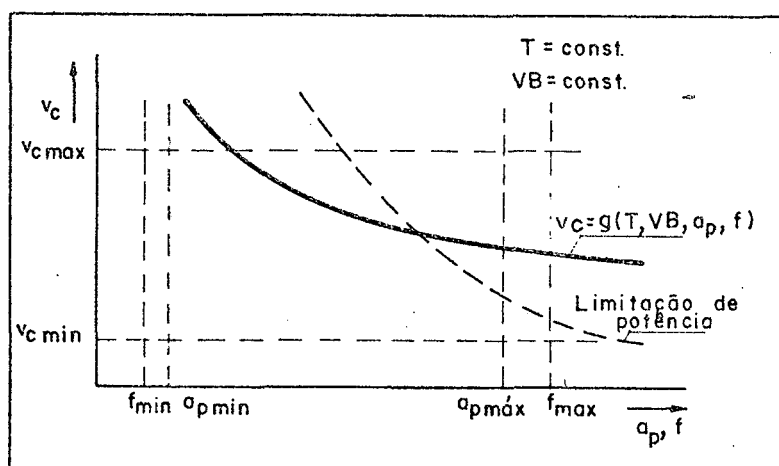


FIG. 5 - Curva esquemática do comportamento da velocidade de corte calculada.

Os valores de  $v_c$  calculados são verificados quanto seus limites de utilização e se necessário, são calculados novos valores ou são usados fatores de correção (15).

Alternativamente, avanços e velocidades de corte podem ser determinados a partir de valores de profundidade de corte e ângulos de posição do gume principal da ferramenta, previamente estipulados. Neste sentido, é utilizado um programa (17) do sistema EXAPT 2 que gera uma tabela de valores calculados e traça o gráfico com as curvas correspondentes (18), conforme a figura 6, que representa a composição das curvas das figuras 4 e 5 em um só gráfico.

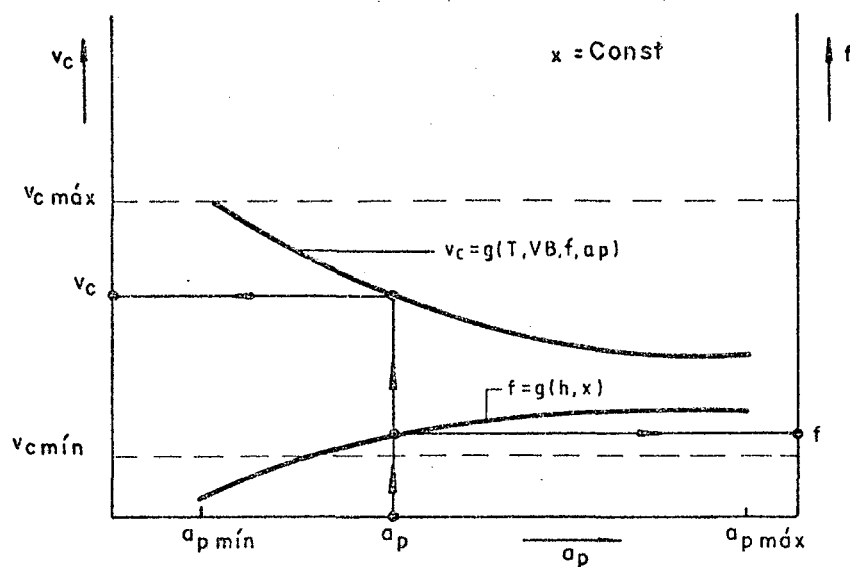


FIG. 6 - Curvas das condições de usinagem determinadas através do sistema EXAPT 2.

Para cada valor de profundidade de corte, com um determinado ângulo de posição do gume principal da ferramenta, tem-se os respectivos valores de avanço e velocidade de corte.

No apêndice I encontra-se um diagrama de blocos que ilustra as etapas realizadas na determinação automática das condições de usinagem (4,15).



### 3 - METODOLOGIA DE ENSAIO SISTEMÁTICO DE USINAGEM PARA GERAÇÃO DE DADOS DO ARQUIVO DE DADOS TECNOLÓGICOS DE USINAGEM

#### 3.1 - Generalidades

Os ensaios de usinabilidade têm sido realizados desde o início do século, cada vez com maior intensidade, porém com uma grande variedade de métodos e, com isso, os resultados obtidos eram confusos e até contraditórios (19), conseqüentemente, sem possibilidade de estabelecer adequadamente algum termo de comparação.

O objetivo da metodologia de ensaio apresentada a seguir, neste capítulo, é especificar procedimentos sistemáticos para realização dos ensaios de vida de gume\* em operações de torneamento, de forma que os resultados obtidos para diferentes materiais ensaiados, independente da instituição geradora, tenham garantia de comparação e, conseqüentemente, a proveitamento por uma comunidade mais ampla. Desta forma, estes resultados podem ser armazenados em um banco de dados e, então processados, visando a otimização e automatização das operações de torneamento.

Os materiais devem ser ensaiados, quanto a usinabilidade, nas condições que melhor representem as aplicações práticas de usinagem. Nestes termos, o ensaio de vida de gume de longa duração é mais representativo, uma vez que os ensaios de curta duração empregam condições de usinagem forçadas. Os gastos de tempo e material exigidos nos ensaios de longa duração, uma vez realizados segundo uma metodologia sistematizada, seriam compensados através de um intercâmbio de informações dos resultados entre os usuários.

A diversidade de condições de usinagem empregadas na fabricação de peças em geral, exige que seja dado um tratamento matemático na obtenção dos resultados de ensaio, que leve em consideração a influência do maior número possível de variáveis de teste. Portanto, é viável um modelo matemático baseado na vida de gume da ferramenta, ou seja, que considere o par material da ferramenta/material da peça além da influência da variação das condições de usinagem. Este modelo fica bem caracterizado na equação de Taylor expandida (equação 1).

---

\* A vida de gume é o fator mais significativo entre os quatro que definem a usinabilidade: vida de gume, componentes da força de usinagem, forma do cavaco e acabamento superficial da peça.

As especificações a seguir, aplicáveis a aços e ferros fundidos, referem-se aos seguintes fatores: corpo-de-prova, ferramenta de corte, condições de usinagem, critérios de fim de vida de gume, força específica de corte, fluido de corte, equipamentos, procedimento de ensaio e processamento dos resultados.

### 3.2 - Corpo-de-Prova

As informações sobre o material do corpo-de-prova devem estar bem definidas para permitir a comparação com outros ensaios. Tais informações incluem a classe, composição química, propriedades mecânicas, microestrutura, processo de obtenção e tratamentos térmicos. Deve ser verificado se todas as informações conferem com as especificações segundo a norma para cada material.

A usinagem do material, para fins de ensaio, deverá ser feita apenas na região do corpo-de-prova em que a dureza e microestrutura estejam dentro dos limites normalizados. Portanto, devem ser feitos cortes de limpeza para remoção das superfícies bruta de fusão, oxidada ou encruada irregularmente. Esta operação propicia, também, a centragem do corpo-de-prova na máquina-ferramenta.

A relação comprimento/diâmetro do corpo-de-prova deve ser tal que não ocorram vibrações durante o ensaio. Esta relação não deve ser superior a 10 (19), com diâmetro inicial superior a 100 mm. Recomenda-se, ainda, que o comprimento seja superior a 300 mm, evitando-se assim excessivas interrupções no ensaio.

A forma dos corpos-de-prova pode ser escolhida entre barra maciça e cilindro vazado, sendo esta última mais apropriada principalmente para ferro fundido, pois proporciona, normalmente, melhor homogeneidade na microestrutura ao longo da seção transversal, além de facilitar o cumprimento das especificações dimensionais com maior aproveitamento de material de usinagem. Considerando a complexidade do processo de fabricação e a homogeneidade da microestrutura ao longo da seção transversal do corpo-de-prova, na utilização do aço é mais indicada a forma de barra maciça. De qualquer maneira, a aquisição dos corpos-de-prova quanto ao material, forma e dimensões deve ser discutida com o fornecedor.

A fixação do corpo-de-prova na máquina deve garantir estabilidade e rigidez, para que possam ser mantidas segurança e precisão no ensaio. Para tal, usa-se placa e ponta, devendo a primeira estar com as

castanhas perfeitamente centradas.

Recomenda-se identificar todos os corpos-de-prova para melhor controle do ensaio.

### 3.3 - Ferramenta de corte

O desenvolvimento de materiais de ferramentas e máquinas - ferramentas NC, levando em conta seus custos, tornaram obsoleto trabalhar com condições de usinagem obtidas na década de 60 (2) e em parte na década de 70 (20). Portanto, a maior severidade imposta às condições de usinagem no torneamento de metais reduz consideravelmente o uso de ferramentas de aço rápido, dando lugar às ferramentas de material sinterizado\*.

A classe da pastilha de corte a ser utilizada no ensaio deve ser definida em função do campo de aplicação (material da peça e condições de corte utilizados), segundo especificações normalizadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Recomenda-se selecionar a ferramenta cuja classe representa o campo de aplicação mais abrangente, embora nada impessa que seja executado, para uma situação particular, um ensaio utilizando pastilha de aplicação mais restrita.

As especificações seguintes, para ferramentas de corte, estão de acordo com normalização internacional - ISO (19).

A figura 7 ilustra os ângulos de trabalho e as superfícies que definem a geometria de uma ferramenta monocortante.

Os ângulos padrão de trabalho especificados na tabela I são definidos pela geometria da sede da pastilha no porta-ferramentas. A tolerância para os ângulos é de  $\pm 0,50$ . O porta-ferramentas deve ter cabo com seção transversal de 25 x 25 mm<sup>2</sup>.

---

\* Metal duro, material cerâmico, cermets, nitreto cúbico de boro, nitreto de silício, nitreto de silício infiltrado com silício, diamante policristalino sintético e outros.

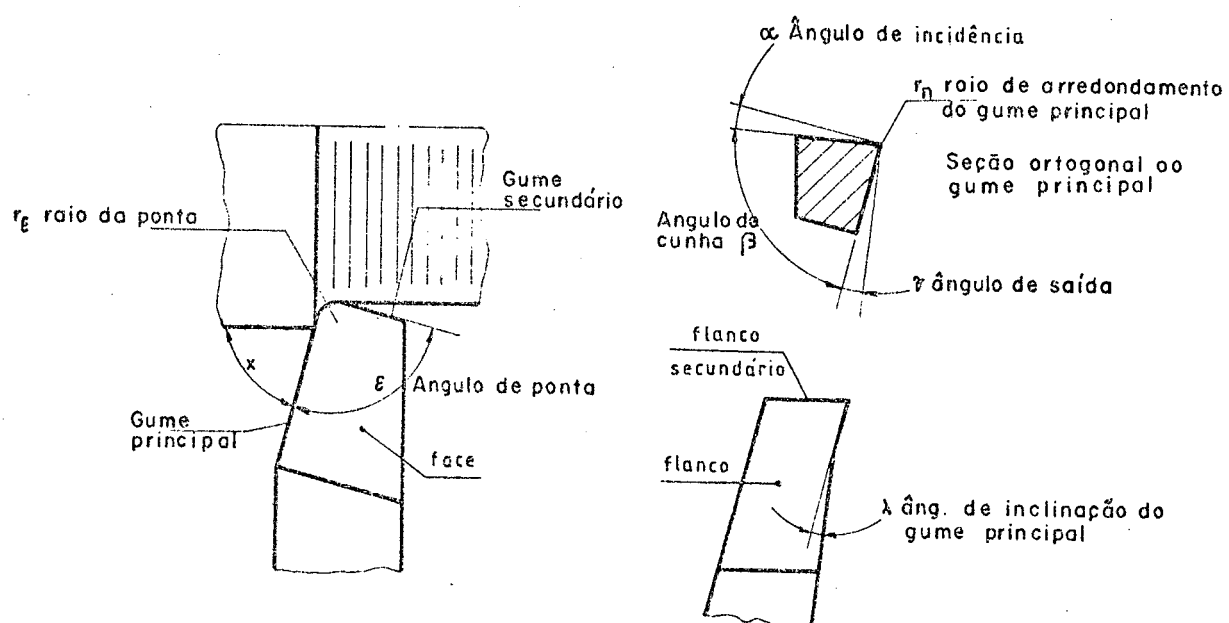


FIG. 7 - Ilustração dos ângulos, gumes e superfícies da ferramenta.

Material da pastilha	Ângulo de saída $\alpha$	Ângulo de incidência $\gamma$	Ângulo de inclinação $\lambda$	Ângulo de posição $\chi$	Ângulo de cunha $\beta$	Ângulo de ponta $\epsilon$
Metal duro	+6	+5	0	60;75;90	90	90
	-6	+6	-6	60;75;90	90	90
Material cerâmico	-6	+6	-6	60;75;90	90	90

TABELA I - Ângulos padrão (19,21), em graus.

A pastilha de metal duro padrão (19) deve ser do tipo quadrada com 12,70 mm de lado e espessuras de 4,76 mm e 3,18 mm para ângulos de saída em trabalho, negativo ou positivo, respectivamente.

A ponta da pastilha deve estar posicionada na altura do eixo da peça e com um comprimento em balanço de 25 mm.

A face e os flancos da ferramenta devem estar perfeitamente lisos e planos. O mesmo deve ocorrer com a sede da pastilha no porta-ferramentas, onde deve ser aplicado um jato de ar comprimido a cada medição de desgaste, garantindo o assentamento perfeito e então, a correta geometria de corte. Pastilhas de fixação mecânica são preferidas em relação às soldadas devido a maior facilidade para realizar-se as medições de desgaste.

A superfície inferior da pastilha não deve projetar-se além de 0,3 mm da base que a suporta no porta-ferramentas, conforme ilustra a figura 8.a.

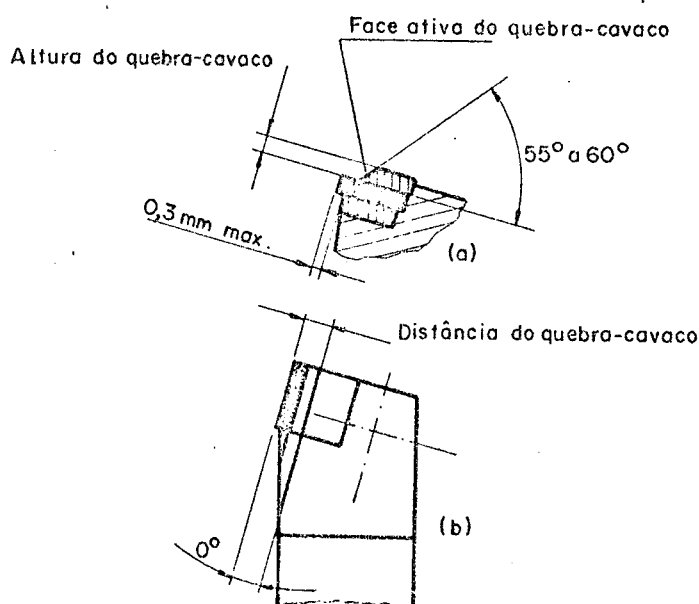


FIG. 8 - Ilustração da colocação da pastilha e quebra-cavaco no porta-ferramentas.

Quando a forma do cavaco é inadequada, deve-se usar um quebra-cavaco, perfeitamente assentado sobre a pastilha. Este deve ser posicionado (figura 8.b) de maneira que a quebra do cavaco seja satisfatória.

### 3.4 - Condições de usinagem

A equação de Taylor expandida é um modelo matemático que representa satisfatoriamente um ensaio de vida de gume por considerar, através de seus expoentes, a influência da variação das condições de corte na usinagem do material. Caso contrário seria necessário um ensaio para cada combinação de condições de usinagem afim de determinar a influência do avanço e profundidade do corte.

Portanto o ensaio deve ser conduzido para a obtenção da equação de Taylor expandida e, neste caso, é necessário utilizar diferentes valores de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Para isso, recomenda-se usar (21):

3 a 6 velocidades de corte;

3 a 5 avanços;

2 a 3 profundidades de corte.

As velocidades de corte devem ser selecionadas de modo que a vida do gume esteja entre 10 e 20 minutos (catálogos de fabricantes de ferramentas informam sobre tais valores, aproximadamente), pois nesta faixa as velocidades usadas são consideradas econômicas quando se trabalha em máquinas NC (2).

O escalonamento entre as velocidades de corte deve ser tal que proporcione uma razão constante, ou seja, um espaçamento adequado na curva de vida da ferramenta para os pontos analisados. Para isso, recomenda-se o uso de séries geométricas de números normalizados, multiplicando os valores das séries por 10 ou potências de 10 (19). As séries mais recomendadas são a R10 e a R20, usando ferramentas de material cerâmico e metal duro, respectivamente.

Os avanços e profundidades de corte devem ser escolhidas em função do material a ser usinado e da pastilha de corte, procurando combiná-los, de forma abrangente, dentro de um campo de operações entre acabamento e desbaste, sem exceder certos limites definidos pelas equações 7, 8 e 9 (19) e representados pelas áreas triangulares da figura 9.

$$a_{p_{\min}} = 2 \cdot r_c \quad (7)$$

$$a_{p_{\max}}' = 10 \cdot f \quad (8)$$

$$f_{\max}' = 0,8 \cdot r_{\epsilon} \quad (9)$$

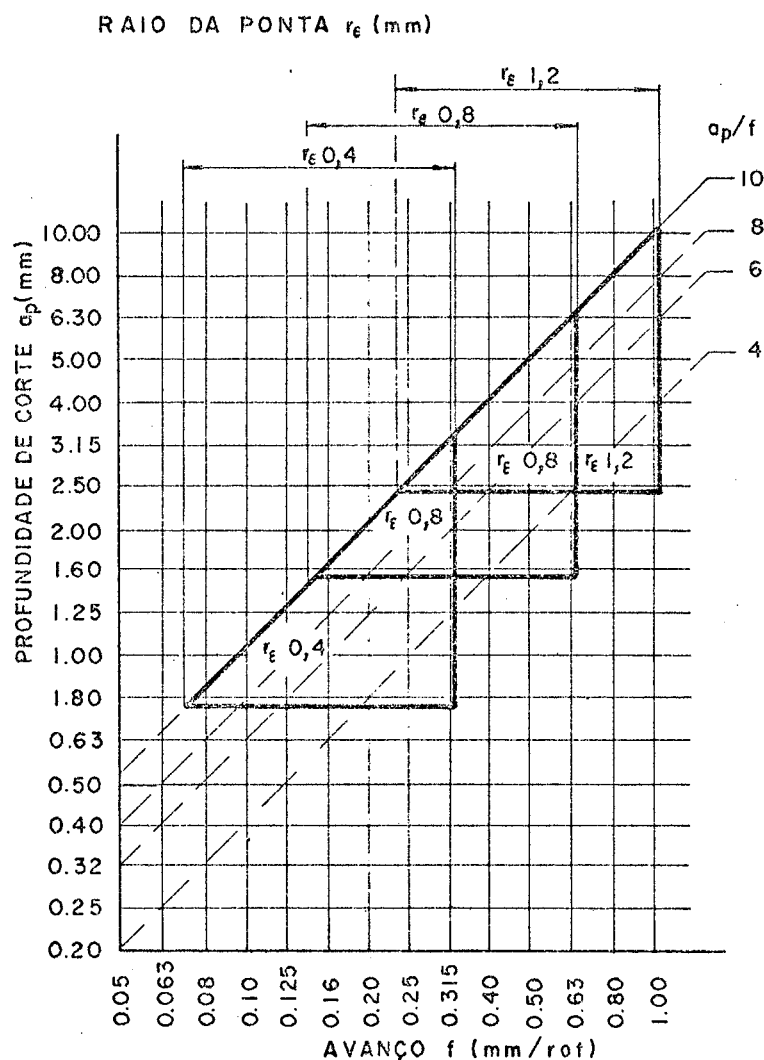


FIG. 9 - Limites das condições de usinagem.

As tolerâncias especificadas para as condições de usinagem são as seguintes (19, 21):

- avanço: -2% até +3%
- velocidade de corte:  $\pm 2\%$
- profundidade de corte:  $\pm 5\%$
- raio da ponta da pastilha:  $\pm 10\%$

### 3.5 - Crêterios de fim de vida de gume

As diversas formas de desgaste de pastilhas de corte possibilitam o uso de vários critérios de fim de vida da ferramenta (19), alguns mais representativos que os outros. O desgaste médio de flanco, VB, a profundidade da cratera, KT, e a relação entre KT e a posição da cratera na face da pastilha, KM, ilustrados na figura 11, estão entre os tipos de marcas desgaste que podem ser usados para critérios de fim de vida por serem estes os que mais contribuem para o fim da vida útil das pastilhas de corte em operações de torneamento. Contribui para a utilização de VB o fato desta marca de desgaste ser relativamente fácil de ser medida. Por essas razões e para evitar a diversificação de critérios, apenas VB, KT e KT/KM são convenientes para os ensaios como base para critérios de fim de vida de gume, optando-se pelo que mais se evidenciar no ensaio realizado. O desgaste de flanco predomina nas baixas velocidades de corte. O desgaste de cratera é um t pico desgaste provocado pelo mecanismo de difusão, portanto predomina nas altas velocidades de corte, onde ocorre maior velocidade de contato. Caso não fique claro qual dos dois tipos de desgaste predominará,   possível usar ambos, como critérios combinados, resultando em uma curva de vida "quebrada", como mostra a figura 10.

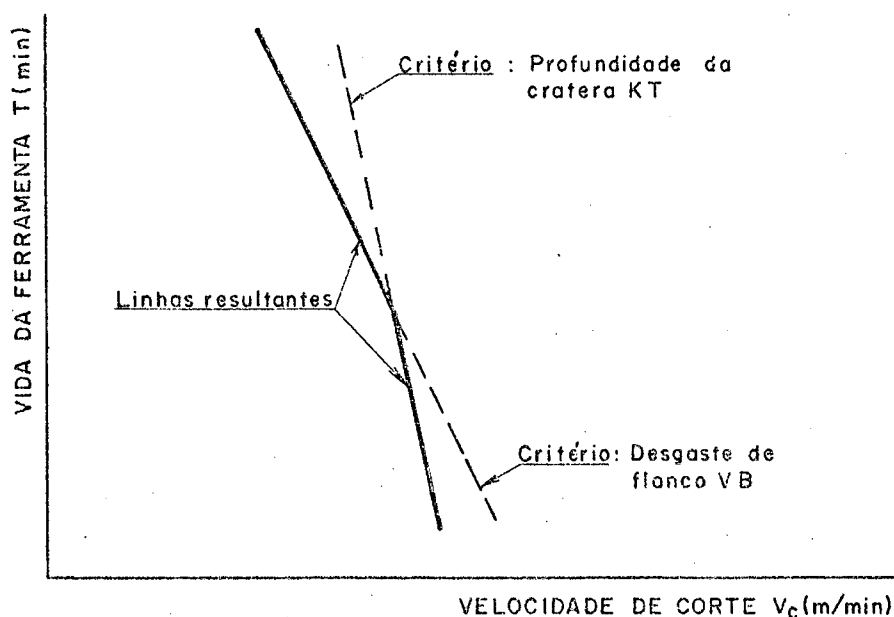


FIG. 10 - Curva  $V_c - T$  "quebrada".



Para fins de medição de desgaste considera-se um comprimento  $L$  do gume principal de corte equivalente ao comprimento da faixa de desgaste do flanco da pastilha (figura 11). Divide-se, então, o gume principal de corte em 3 (três) zonas, sendo que a zona central tem comprimento  $L/2$  e cada zona lateral tem comprimento  $L/4$ .

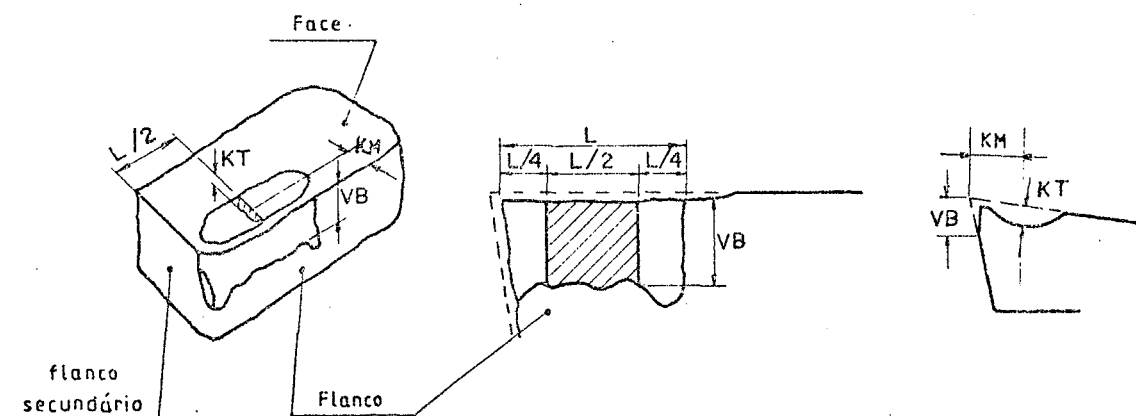


FIG. 11 - Ilustração das marcas de desgaste da pastilha.

O desgaste médio de flanco, VB, é medido na zona  $L/2$  (parte achurada da figura 11) e corresponde à distância entre a posição original do gume principal e a linha média representada na borda inferior da faixa de desgaste.

A profundidade da cratera, KT, corresponde à máxima distância entre o fundo da cratera e a posição original da face da pastilha, medida a uma distância  $L/2$  do gume secundário (figura 11).

A posição da cratera na face da pastilha, KM, é medida pela distância do centro da cratera à posição original do gume principal da pastilha.

Antes de efetuar as medições de desgaste, deve ser verificado se há presença de partículas que aderiram às regiões de medição, podendo alterar a medida real. A remoção dessas partículas, caso existam, deve ser feita com cuidado para que a marca de desgaste não seja alterada, e sem utilização de produtos químicos que possam reagir com o material da pastilha alterando suas características.

A dimensão do desgaste de flanco ou a profundidade da cratera

ra para o fim de vida do gume, com pastilhas de metal duro e de material cerâmico a ser adotado no ensaio, varia em função da operação de torneamento. A determinar um certo acabamento superficial na peça. Desta maneira, os valores para VB (22), para KT (19) e para KT/KM (22) são os seguintes:

- a)  $VB = 0,25$  a  $0,28$  mm\*, para operações de acabamento;
- b)  $VB = 0,38$  a  $0,75$  mm\*, para operações de desbaste;
- c)  $VB = 0,80$  a  $1,20$  mm, para operações de desbaste pesado;
- d)  $KT = 0,06 + 0,3.f$ ;  $f$  = avanço em mm/rot.
- e)  $KT/KM = 0,1$

### 3.6 - Força específica de corte

A força de usinagem,  $F$ , aplicada no gume da pastilha, em operações de torneamento, pode ser decomposta em três componentes ortogonais, como mostra a figura 12. Tais componentes são definidas como força principal de corte,  $F_c$ , força de avanço,  $F_f$ , em concordância com os vetores velocidade de corte,  $v_c$ , e velocidade de avanço,  $v_f$ , respectivamente, e a força passiva,  $F_p$ .

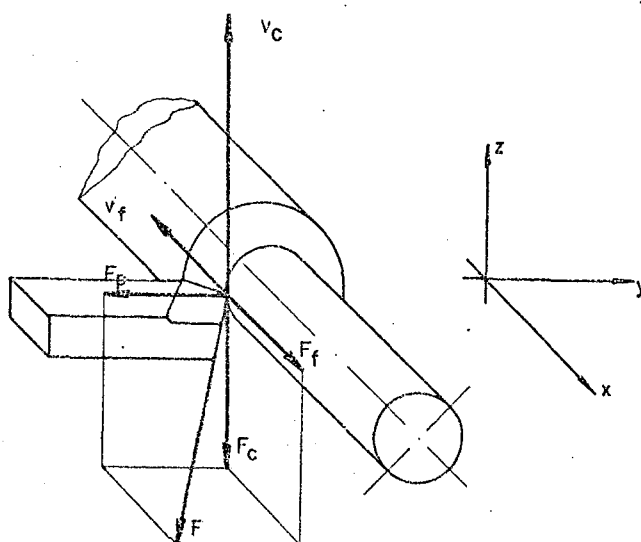


FIG. 12 - Componentes da força de usinagem no torneamento.

---

\* Os valores de VB assumidos nos itens a e b proporcionam uma margem de segurança para evitar a quebra da pastilha.

A força específica de corte,  $k_{cl.1}$ , é a força de corte atuante em uma seção de corte de  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  de área. Este parâmetro de usinagem é obtido, experimentalmente, através de medições de força principal de corte,  $F_c$ , para diversas seções de usinagem.

Para obtenção de  $k_{cl.1}$ , o ensaio deve ser conduzido com as especificações dos itens 3.2 e 3.3, para o corpo-de-prova e ferramenta de corte, respectivamente. As condições de usinagem recomendadas são dadas na tabela II (23).

Condições de usinagem	1	2	3	4	5	6
Avanço (mm/rot)	0,1	0,16	0,25	0,4	0,63	0,8
Profundidade de corte (mm)	2,5(3,0)	2,5(3,0)	2,5(3,0)	2,5(3,0)	2,5(3,0)	2,5(3,0)
Raio da ponta da pastilha(mm)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

TABELA II - Condições de usinagem para determinação de  $k_{cl.1}$ .

Para cada condição de usinagem, deve-se tomar, no mínimo três leituras de força utilizando-se o valor médio.

As medições de força, para determinação de  $k_{cl.1}$ , só podem ser efetivadas enquanto o desgaste da pastilha não ultrapassar os valores de  $VB = 0,1 \text{ mm}$  e/ou  $KT = 0,01 \text{ mm}$  (23).

Para cada condição de usinagem usada no ensaio (tabela II), obtém-se uma força de corte.

Para eliminar a influência de ângulo de posição  $\chi$  na determinação de  $k_{cl.1}$ , vale-se das expressões 10 e 11.

$$b = \frac{a_p}{\sin \chi} \quad (10)$$

$$h = f \cdot \sin \chi \quad (11)$$

Sabendo-se que:

$$F_c = h^{(1-m_c)} \cdot b^\psi \cdot k_{cl.1} \quad (12)$$

e que  $\psi \approx 1$ , para o torneamento, e de posse dos valores de  $F_c$ ,  $b$  e  $h$  pode-se determinar o valor de  $k_{cl.1}$  por meio de regressão linear dos pontos experimentais colocados em um gráfico (escalas logarítmicas) onde, no eixo das abscissas tem-se os valores de  $h$  e no eixo das ordenadas os valores de  $F_c/b$ , como mostra a figura 13.

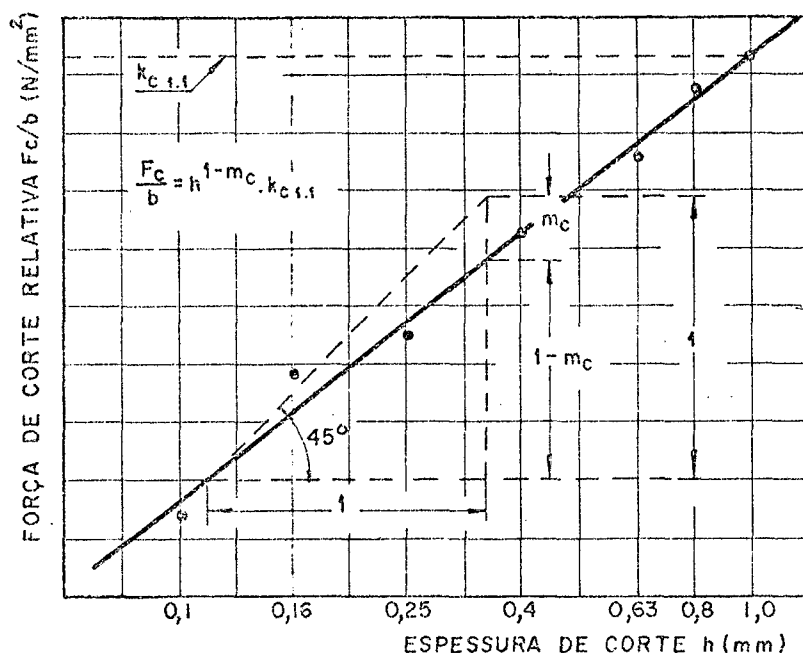


FIG. 13 - Determinação gráfica de  $k_{cl.1}$  e expoente  $(1-m_c)$ .

O valor de  $k_{cl.1}$  é, portanto, igual ao valor de  $F_c/b$  para uma espessura de corte  $h$  igual a 1 mm. O valor do expoente  $(1-m_c)$  corresponde a inclinação da reta. /b

Com os valores de  $k_{cl.1}$  e  $1-m_c$  determinados, a força de corte pode então ser calculada para as mais diferentes condições de usinagem que se fizerem necessárias em operações de torneamento, utilizando-se a equação de Kienzle, abaixo:

$$F_c = b \cdot h^{(1-m_c)} \cdot k_{cl.1} \quad (13)$$

Tendo-se disponíveis, no ADATU, os valores obtidos para  $k_{cl.1}$  e  $1-m_c$ , estes poderão ser utilizados na determinação automática das condições de usinagem. Através de comparação da potência de corte exigida com a potência disponível na máquina-ferramenta, poderão ser otimizados os parâmetros de corte sem correr o risco de sobrecarregar a máquina-ferra -

menta.

### 3.7 - Fluído de Corte

O tipo e o emprego de fluído de corte numa operação de torneamento, dependem do material da pastilha de corte, do material da peça e do tipo de operação.

Na usinagem de aços comum ao carbono e de baixa liga com pastilhas de metal duro, não é recomendado o uso de fluído de corte para operações de desbaste, porém para operações de acabamento recomenda-se fluídos de alto calor específico (24). Com pastilhas de material cerâmico se trabalha a seco, sempre que possível. No torneamento de ferros fundidos recomenda-se o corte a seco, independente do material da pastilha e do tipo de operação.

Fluídos de corte com alta alcalinidade não devem ser usados, uma vez que atacam quimicamente as superfícies da máquina-ferramenta.

Quando é usado fluído de corte, este deve ser direcionado para a face da pastilha de maneira que envolva completamente suas partes ativas.

O fluxo de fluído não deve ser inferior a  $3 \text{ l/min}$  ou  $0,1 \text{ l/cm}^3$  de metal removido (19), garantindo assim eficientes refrigeração e lubrificação, sem que o fluído de corte retenha a energia térmica absorvida devido ao trabalho de usinagem específico (em torno de  $4 \text{ J/mm}^3$ ).

### 3.8 - Equipamentos

A máquina-ferramenta, utilizada para realização do ensaio de vida de gume, deve ser rígida de maneira que não apresente tendências a vibrações que possam influir no desgaste da pastilha. Seus componentes devem garantir as tolerâncias especificadas para as condições de usinagem. A máquina deve permitir avanços suficientemente variáveis de modo a cobrir todo o campo de condições escolhidas para o ensaio, além de ter comando de velocidades com variação contínua.

Os equipamentos destinados a medição, no ensaio, bem como aqueles usados na caracterização do material (ver item 4.1), devem ter suficiente resolução para distinguir as tolerâncias especificadas para a realização do ensaio.

A relação de equipamentos com as características dos mes

mos deve acompanhar as demais informações do ensaio, como forma de elucidar a aceitação dos resultados quanto aos meios usados para sua obtenção.

### 3.9 - Procedimento de ensaio

Quando não se dispõe de equipamento de coleta automática de dados, os equipamentos devem ser montados de tal maneira que o ensaio seja conduzido com facilidade e sob controle. A divisão das tarefas para que duas pessoas realizem o ensaio, proporciona maior eficiência no seu controle e realização. Portanto, os equipamentos são arranjados fisicamente em dois agrupamentos, a saber:

- um agrupamento operacional, onde atuará o operador da máquina-ferramenta;
- um agrupamento de registro de dados e controle do ensaio, onde atuará o experimentador.

Os componentes da máquina-ferramenta para acionamento de avanços, profundidades de corte e rotações, bem como equipamentos de medição, devem ser aferidos. A aferição pode ser dispensada caso certifique-se que esta foi feita recentemente, mantendo ainda sua validade. A aferição acusa se os equipamentos estão operando corretamente na faixa de tolerâncias especificadas para o ensaio e, em caso de erros, possam ser feitas as correções.

Os corpos-de-prova devem ser preparados para o ensaio, ou seja, eventuais operações de usinagem para garantir perfeita fixação na máquina-ferramenta e remoção da superfície bruta ou defeituosa.

Os gumes das ferramentas de corte devem ser verificados, quanto ao estado de conservação, com ampliação mínima de 10 vezes.

Cada corpo-de-prova assim como cada gume da pastilha devem ser devidamente identificados por marcas, facilitando o controle do ensaio.

Uma vez definidas as combinações de condições de usinagem, o material das peças e o material das pastilhas de corte, faz-se a seleção do critério de fim de vida de gume a ser usado no ensaio.

As medições de desgaste devem ser realizadas de acordo com intervalos de tempo, devidamente cronometrados, segundo a série: 2 - 4 - 8 - 12,5 - 16 - 20 - 25 - 31,5 minutos, sendo recomendado de seis a oito medições de desgaste para cada gume da pastilha (21). Caso o desgaste se-

ja pouco evidenciado, a usinagem pode ser prolongada para 40 ou 50 minutos, visando atingir-se o critério de fim de vida previamente estabelecido. Caso o desgaste seja muito evidenciado, a usinagem pode ser reduzida a quatro medições de desgaste, e não menos.

Entre as medições de desgaste de duas combinações de condições de usinagem deve ser efetuado o ensaio para determinação da força específica de corte  $k_{cl.1}$  (ver item 3.6). Preferencialmente os ensaios de vida de gume são feitos sem utilização da plataforma dinamométrica. Quando se trabalha em condições extremas de usinagem, pode-se ter uma sobrecarga da plataforma devido ao aumento do desgaste ou quebra da ferramenta (quando se trabalha com a pastilha pouco desgastada, esta sobrecarga eventual é menos frequente). Por isso é mais conveniente executar-se os ensaios para a determinação de  $k_{cl.1}$  e  $l-m_c$  à parte, com material do mesmo lote.

A preparação, antecipadamente ao ensaio, de folhas de registro de dados em uma sequência pré-definida, é um procedimento que contribui para a eficiência do ensaio, e deve ser adotado. Cada folha de registro de dados deve ser exclusiva para um gume da pastilha, uma combinação de condições de usinagem e um critério de fim de vida, tanto na determinação da vida de gume quanto na definição da força específica de corte.

Um memorial de ensaio, feito durante sua realização, pode ser importante para esclarecimentos que por ventura se façam necessários na análise dos resultados, e portanto deve ser feito. Neste memorial deve ser relatado qualquer anomalia, fato inesperado, alteração no procedimento previamente planejado e observações gerais que possam ocorrer.

Outro fato, entre os já citados, que contribui para a eficiência do ensaio é que seus executores (experimentador e operador da máquina) façam, antecipadamente, o planejamento de sua atuação conjunta no ensaio.

Um ensaio preliminar deve ser realizado para que, com seus resultados conhecidos, possa-se estimar o comportamento do ensaio final e, portando, desenvolvê-lo com maior objetividade. E ainda, para que se possa estimar a quantidade de material consumido e o número mínimo de medições de desgaste, determinado através do teste de Kolmogorov - Smirnov(25). Neste pré-ensaio deve-se usar um número mínimo de combinações de condições de usinagem de maneira que representem todas as demais escolhidas para o ensaio. O procedimento do pré-ensaio é o mesmo a ser utilizado no ensaio final, descrito acima, exceto que as medições de desgaste da pastilha são feitas até um tempo máximo de 25 minutos.

### 3.10 - Processamento de resultados

Os dados específicos do material da peça e do material da pastilha, e os dados obtidos no ensaio de vida de gume constituem os valores de referência para preparação do ADATU (conforme item 2.2.4). Porém os dados obtidos no ensaio de vida de gume devem ser processados para determinação da equação de Taylor expandida (ver item 2.2.3), através do cálculo da constante VSTAND e dos expoentes ECONST, FCONST, GCONST e HCONST. Um programa de computador (14), pertencente ao CINFUS (2), executa tais cálculos.

Um segundo programa de processamento de resultados de ensaio (17), também pertencente ao CINFUS (2), utiliza como dados de entrada: a constante e os expoentes da equação de Taylor, os dados da máquina-ferramenta, da pastilha de corte e do material da peça a serem usados numa operação de torneamento específica, e gera em forma de tabela e de gráfico, combinações de condições de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) otimizadas.



#### 4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

##### 4.1 - Equipamentos

##### 4.1.1 - Equipamentos usados no ensaio de vida de gume

A - Máquina-ferramenta: torno Imor

modelo: P - 400

Fabricante: Indústria Romi S.A. - São Paulo

Distância entre pontas: 1000 mm

Diâmetro máximo torneável: 430 mm

A máquina-ferramenta é apropriadamente adaptada para possibilitar variação contínua de velocidades de corte. Para isso foram acoplados os seguintes equipamentos:

A.1 - Variador de Tensão

tipo: RT1 - 88

Fabricante: Eletro Máquinas "Anel" S.A.  
São Paulo

A.2 - Retificador

Fabricante: Eletromáquinas "Anel" S.A.  
São Paulo

A.3 - Motor de Corrente Contínua

Fabricante: Eletro Máquinas "Anel" S.A.  
São Paulo

Potência: 22 KW

B - Ferramentas: pastilhas reversíveis de metal duro

Fabricante: Brassinter S.A. - São Paulo

Referência: tipo SNUN 12 04 08 - classe K10

C - Porta-pastilhas

Fabricante: Brassinter S.A. - São Paulo

Referência: CSBNR - 25 25 M12

( $\gamma = -59^\circ$  ;  $\alpha = 50^\circ$  ;  $\chi = 75^\circ$  ;  $\epsilon = 90^\circ$ )

D - Plataforma dinamométrica de três componentes  
Fabricante: Kistler Instruments A.G. - Suíça  
Modelo: 9257-A  
Princípio de medição: piezoelétrico  
Força Máxima: 10000 N, na vertical (direção z)  
5000 N, na horizontal (direções x,y)  
Capacidade de sobrecarga: 50%  
Resolução: 0,01 N  
Erro máximo: 1%  
Rigidez: 2000 N/ $\mu$ m, na vertical  
1000 N/ $\mu$ m, na horizontal  
Frequência de ressonância: 1000 Hz  
Linearidade: 1%

E - Amplificador de cargas elétricas  
Fabricante: Kistler Instruments A.G. - Suíça  
Modelo: 5001  
Campo de medição: 10 a 500000 pC em 12 faixas  
Campo do capacitor variável: 10 a 50000 pF  
Tensão máxima de saída: 10 V  
Erro máximo: 0,05%  
Precisão das escalas:  $\pm$  1% (mais sensível)  
 $\pm$  3% (normal)

F - Indicador analógico  
Fabricante: Kistler Instruments A.G. - Suíça  
Modelo: 5501  
Campo de Medição: 0 a 10 V  
Resolução: 0,1 V  
Tensão máxima admissível na entrada: 10 V  
Precisão: máx. 1,2%

G - Taco-gerador  
Fabricante: Beckmann - Helipot Div.  
Modelo: 9150, DC TACHOMETER  
Constante de Medição:  $7 \cdot 10^{-3}$  V/rpm

## H - Multímetro digital

Fabricante: Analog Instrumentos Analógicos Digitais Ltda.  
São Paulo

Modelo: M3513

Campo de Medição em C.C.: 0 a 20 V

## I - Microscópio de ferramentaria

Fabricante: Nikon - Japão

Modelo: Mesuriscopo

Campo de Medição da mesa micrométrica: 50 mm X 100 mm

Resolução: 0,001 mm

#### 4.1.2 - Equipamentos usados para a caracterização do material

## A - Microscópio

Fabricante: Carl Zeiss - Jena

Modelo: Neophot - 21

## B - Máquina Universal de ensaios

Fabricante: Wolpert

Modelo: Testatron

Capacidade: 100 kN

## C - Máquina Universal de Ensaios

Fabricante: VEB THÜRINGER INDUSTRIEWERK RAUENSTEIN

Modelo: 280/65

## D - Microscópio de ferramentaria

(caracterizado no item 4.1.1)

#### 4.1.3 - Equipamentos usados nas aferições

## A - Transdutor magnético

Fabricante: Brüel & Kjaer

Modelo: MM 0002

Sensibilidade: 1,5 mV/cm.s para uma distância de 2 mm

Distorção: menor que 5%

B - Contador digital de pulsos elétricos

Fabricante: Recal Instruments Ltd.

Modelo: 835 - série nº 3040

Sensibilidade: sinal mínimo  $\pm 1,5$  V

sinal máximo  $\pm 35,0$  V

Medição de frequência: até 15 MHz

Constante de tempo: 1  $\mu$ s até 10 s

C - Balança dinamométrica mecânica

Construção: Harstein, H. - Lab. de Máquinas Ferramentas - UFSC

Relação de braços: 1 : 11

Sensibilidade: 6 seg/mm.N

D - Relógio comparador

Fabricante: Carl Zeiss Jena- DDR

Modelo: TGL 7483/I

Resolução: 0,001 mm

4.1.4 - Equipamentos usados no teste de funcionamento do ADATU

A - Máquina-ferramenta: torno NC

Fabricante: CSEPEL - Hungria

Modelo: torno revólver Decathlon ERI 250 equipado com comando numérico BOSCH NC 802

Diâmetro máximo livre acima do leito da máquina: 500 mm

Diâmetro máximo livre acima do porta-ferramenta: 350 mm

Distância máxima entre a árvore e o porta-ferramenta: 750 mm

Número de rotações da árvore: 10

Fator de relação entre as rotações: 1,41

Faixa de avanços: 1 a 2000 mm/min (variação contínua)

4000 mm/min (marcha rápida)

Deslocamento longitudinal máximo: 500 mm

Deslocamento transversal máximo: 225 mm

Número de posições de ferramentas: 10

Potência do motor da árvore: 10/13 KW

Torque máximo da árvore: 980 N.m

B - Ferramentas: pastilhas reversíveis de metal duro

B.1 - Pastilha de tornear SNUN 12 04 08 - classe K10

Fabricante: Brassinter S.A. - São Paulo

B.2 - Pastilha de copiar DMMG 15 06 04 - classe P10

Fabricante: Sandvik Coromant - São Paulo

C - Porta-pastilhas

C.1 - Para pastilha de tornear: CSBNR - 19 19 J12

Fabricante: Sandvik Coromant - São Paulo

C.2 - Para pastilha de copiar: R. 171.35 - 20 20 K15

Fabricante: Sandvik Coromant - São Paulo

D - Computador IBM

Fabricante: IBM

Modelo: 4341

E - Computador SISCO

Fabricante: SISCO - Sistema de Computadores S.A. - São Paulo

Modelo: MB-8000

#### 4.2 - Aferições

##### 4.2.1 - Aferição do sistema de acionamento de avanços da máquina-ferramenta (torno IMOR P-400)

A grande maioria dos tornos convencionais apresenta dois sistemas de avanço: o fuso e a vara. Para trabalhos de pesquisa, onde são necessários avanços precisos e constantes, opta-se pelo fuso, pois a vara pode apresentar um escorregamento em relação à rotação da árvore (embreagem de segurança). Para ter certeza que ao longo do percurso longitudinal de usinagem o avanço é constante, foram feitas medições da precisão de avanço do fuso, em três posições, P1, P2 e P3, correspondentes ao início, meio e fim do percurso de usinagem do corpo-de-prova (figura 14).

Para executar a medição foi fixado um relógio comparador no barramento do torno, conforme esquema da figura 14, o qual registrava os deslocamentos do carro longitudinal correspondente a 10 voltas da árvore. Para diminuir a incerteza repetiu-se as medições por três vezes.

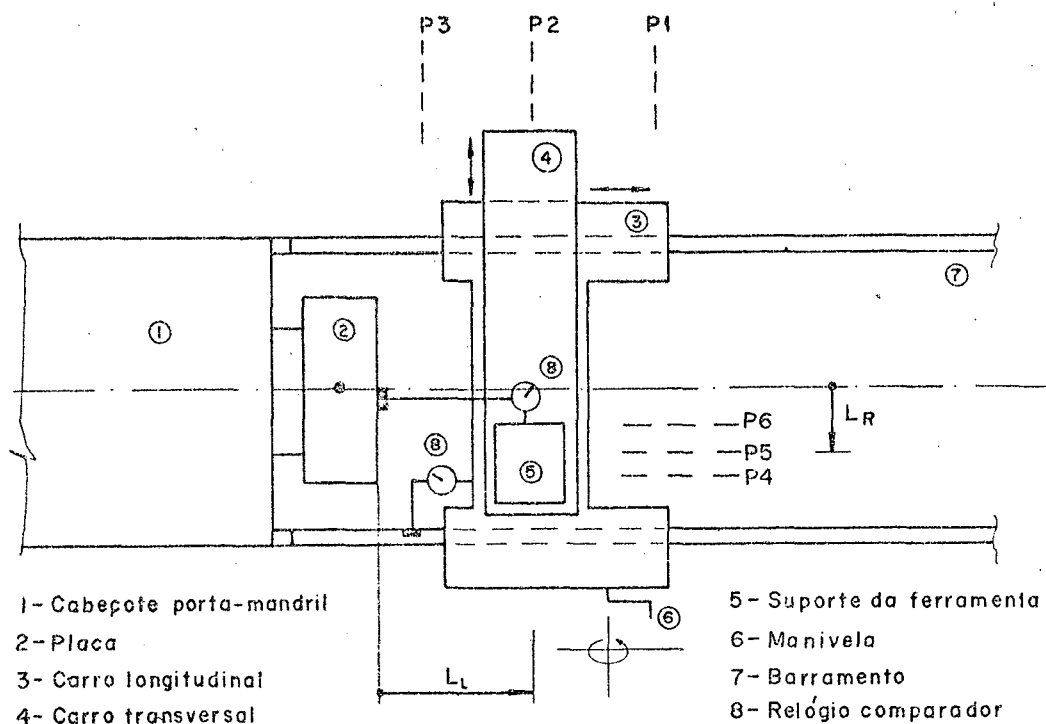


FIG. 14 - Esquema para aferição de avanço e profundidade de corte.

O erro relativo foi definido pela seguinte equação:

$$ER = \frac{VM - VT}{VT} \cdot 100 \quad (14)$$

onde:

ER: erro relativo, %

VM: valor medido

VT: valor teórico

A aferição foi feita para a faixa de valores de avanço (0,20 - 0,75 mm/volta) usados no ensaio de vida de gume.

O maior erro relativo encontrado foi de -2% para um avanço  $f=0,20$  mm/volta na posição P2 (Apêndice IV), estando dentro das tolerâncias no item 3.4.

#### 4.2.2 - Aferição do sistema de acionamento de profundidade de corte da máquina-ferramenta (torno IMOR P-400)

O acionamento da profundidade de corte, nos tornos convencionais, é feito através de um sistema de fuso e porca. O posicionamento da ferramenta ao longo do percurso transversal, em relação ao barramento do torno, é feito por meio de uma manivela acoplada ao fuso do carro transversal. Para ter certeza que o acionamento da profundidade de corte é preciso e constante, foram feitas medições da precisão das profundidades de corte, em três posições, P4, P5 e P6 (figura 14) correspondentes as posições externa média, e interna da parede dos corpos-de-prova.

Para executar a medição foi fixado um relógio comparador à placa (árvore parada), o qual registrava o deslocamento do carro transversal correspondente ao valor da profundidade de corte acionada na manivela. Para diminuir a incerteza repetiu-se as medições por três vezes.

O erro relativo foi calculado segundo a equação 14. A aferição foi feita para a faixa de valores de profundidade de corte (1,0 a 7,0 mm) usados no ensaio de vida de gume.

O maior erro relativo encontrado foi de 0,77% para uma profundidade de corte  $a_p = 3,0$  mm, nas posições P5 e P6 (Apêndice IV), estando dentro das tolerâncias especificadas no item 3.4.

#### 4.2.3 - Aferição do sistema de medição de rotações da máquina-ferramenta (torno IMOR P-400)

A realização de ensaios de usinagem em máquinas-ferramentas com variação contínua de rotações, exige que o controle das velocidades de corte seja feito através de valores de tensão proporcionais à rotação da árvore da máquina. Através da aferição é determinada a equação de proporcionalidade, cujo procedimento é descrito abaixo, para os equipamentos utilizados neste trabalho.

Uma roda dentada com 15 dentes acoplada a um eixo, foi fixada à placa do torno. Um transdutor magnético foi posicionado tangencialmente à roda dentada, a 2 mm desta (figura 15). Para cada dente da roda em movimento era emitido um pulso elétrico que era registrado no contador digital, possibilitando a contagem do número de rotações da árvore da máquina. Na extremidade da árvore foi colocado um taco-gerador que gerava tensões proporcionais às rotações. Um multímetro digital fazia a indicação das ten

sões. O contador digital foi regulado para fazer o registro das rotações em intervalos de 10 segundos. Tem-se, portanto, uma relação direta entre o número de rotações e o número de pulsos elétricos, dado pela seguinte equação:

$$n = \frac{N_p \cdot 60}{10 \cdot 15} = 0,4 N_p \quad (15)$$

onde:

$n$  = rotações por minuto

$N_p$  = número de pulsos elétricos em 10 minutos

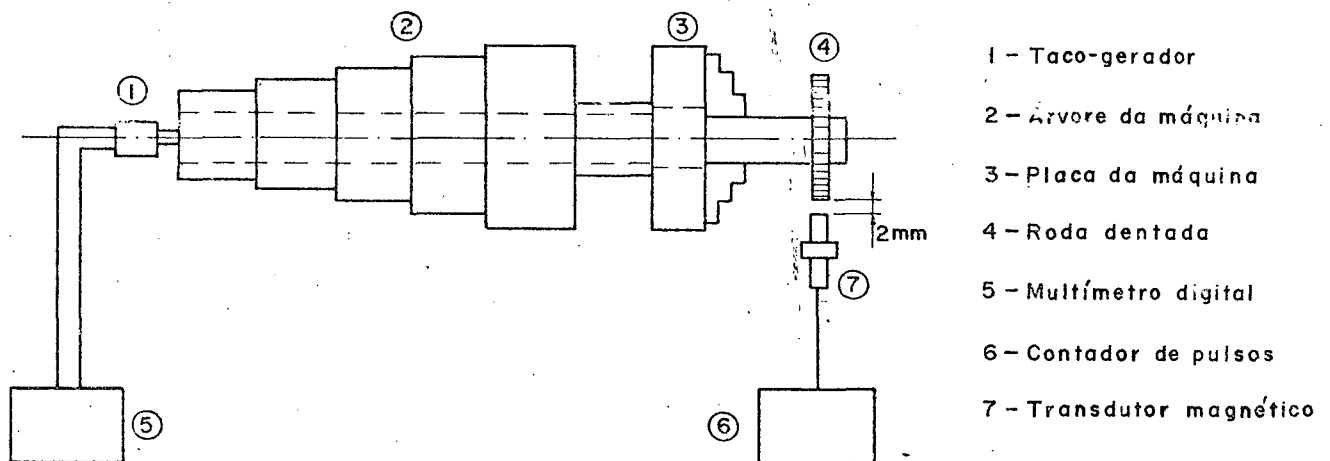


FIG. 15 - Esquema para aferição do sistema de medição de rotações.

Sabe-se que a velocidade de corte,  $v_c$ , varia com o diâmetro a ser usinado,  $d$ , para uma rotação,  $n$ , constante, segundo a equação a baixo:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (16)$$

Como o ajuste das rotações na máquina é escalonado e necessitando-se compensar a variação de  $v_c$  com a diminuição de  $d$ , mantendo-se a mesma posição da alavanca seletora de rotações, variou-se a tensão de ali



mentação do motor elétrico\* em uma certa faixa de valores. Considerando que a tensão nominal de trabalho do motor é 380 V, foi adotada, para aplicação no ensaio de vida de gume, a faixa de 300 V a 400 V. Portanto, aferição das rotações foi realizada dentro desta faixa.

Para cada posição da alavanca seletora de rotações, usou-se três valores de tensão diferentes\*\* que corresponderiam a outros três valores no taco-gerador. Para cada tensão aplicada, foram feitas cinco medições do número de pulsos elétricos, dos quais obteve-se a média ( e o desvio padrão). Então, pela equação 15, determinou-se as rotações equivalentes ao número médio de pulsos elétricos.

Com os valores das tensões geradas no taco-gerador e os correspondentes valores médios das rotações (Apêndice IV), pode-se montar, por regressão linear, a seguinte equação:

$$U = 5,63 \cdot 10^{-3} \cdot n - 2,0 \cdot 10^{-2} \quad (17)$$

onde:

$U$  = tensão no multímetro digital

O coeficiente de determinação da equação é igual a 1,0.

Isolando-se a variável  $n$  na equação 16 e substituindo-a na equação 17, tem-se:

$$U = 1,79 \cdot \frac{v_c}{d} - 2,0 \cdot 10^{-2} \quad (18)$$

Através da equação 18, é possível determinar a tensão que o multímetro deverá indicar para valores específicos de velocidade de corte e diâmetro do corpo-de-prova usado no ensaio.

---

\* Motor de corrente contínua, para acionamento da árvore principal do torno.

\*\* 300 V, 340 V e 380 V.

#### 4.2.4 - Aferição do sistema de medição das componentes da força usinagem

A aferição foi feita para diferentes escalas de cada módulo do indicador analógico, abrangendo todos os valores de forças estimados para o ensaio, ou seja:

- módulo de medição da força de corte ( $F_c$ ):

escala  $1 \times 10^2$  (onde 10 V correspondem a 1000 N)

escala  $2 \times 10^2$  (onde 10 V correspondem a 2000 N)

escala  $5 \times 10^2$  (onde 10 V correspondem a 5000 N)

- módulo de medição da força de avanço ( $F_f$ ):

escalas:  $1 \times 10^2$

$2 \times 10^2$

$5 \times 10^2$

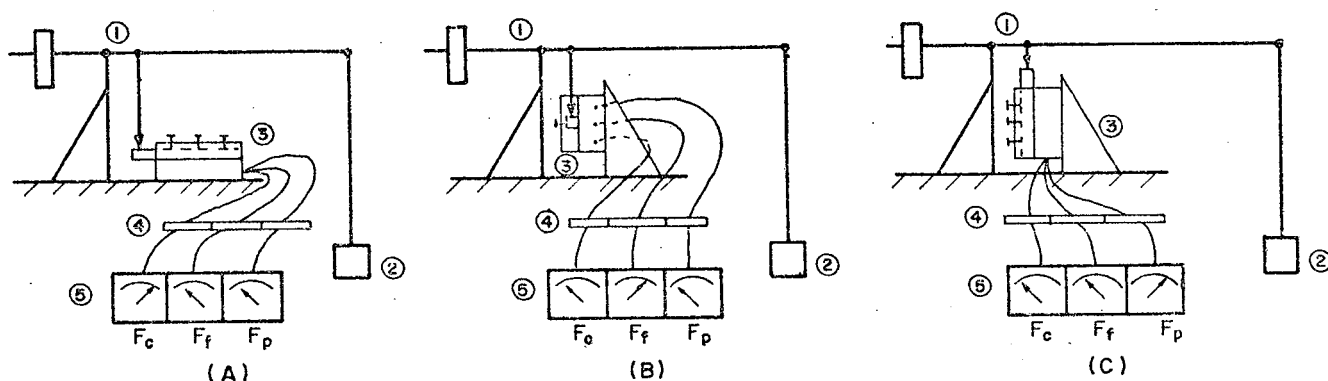
- módulo de medição da força passiva ( $F_p$ ):

escalas:  $1 \times 10^2$

$2 \times 10^2$

A atuação das forças sobre o cristal piezoelétrico do dinamômetro gera cargas elétricas (11) que são transformadas em tensões elétricas e, depois de amplificadas, são mostradas no indicador analógico.

Inicialmente, determinava-se a posição de ajuste da sensibilidade do transdutor de sinais que melhor representasse, ao longo da escala, o valor da força aplicada na plataforma dinamométrica, ou seja, a posição da chave da sensibilidade do transdutor que em 1V correspondesse a 1N. Após, nivelava-se a alavanca da balança dinamométrica e então carregava-se a plataforma dinamométrica para os três módulos, em suas diferentes escalas, e fazia-se a leitura no indicador analógico. Para cada aplicação de carga, o amplificador de cargas era "zerado" e a leitura era feita no instante de aplicação. A figura 16 ilustra, esquematicamente, as posições da plataforma dinamométrica e de aplicação de carga nas três coordenadas durante a aferição.



- 1 - Balança dinamométrica mecânica
- 2 - Massas de pesos aferidos
- 3 - Plataforma dinamométrica
- 4 - Amplificador de sinais
- 5 - Indicador analógico

FIG. 16 - Esquema para aferição do sistema de medição das componentes da força de usinagem. (A) de corte  $F_c$  (z), (B) Força de avanço  $F_f$  (x); (C) Força passiva  $F_p$  (y).

Os erros relativos foram calculados utilizando-se a equação 14. Os resultados mostraram que os erros foram muito pequenos, concordando com os dados do fabricante. O maior erro relativo foi de 0,76% (Apêndice IV), o qual pode ser tolerado para a execução dos ensaios. Foi verificado também se o dinamômetro apresentava erros de histerese, o que não se confirmou.

#### 4.3 - Material dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram fabricados (fundidos) na forma e dimensões estipuladas para utilização no ensaio de vida de gume, ou seja, tubos de 530 mm de comprimento, 210 mm de diâmetro externo e 120 mm de diâmetro interno.

O material usado neste trabalho foi o Ferro Fundido Cinzento Comum de Baixa Resistência Mecânica (ABNT FC-100).

Para que o limite de resistência mecânica de material pudesse ser medido de acordo com a ABNT, foram fundidas barras de 30 mm de diâmetro, paralelamente a fabricação dos tubos com o metal da mesma pane-

la. Pode-se constatar, através de ensaios de tração, testes de dureza e análise metalográfica, que o material das barras correspondia aquele classificado como ABNT FC-100. Como a espessura da peça, na fabricação, influi na resistência do ferro fundido cinzento (26), e a sua classificação é dada em função desta propriedade, o material dos corpos-de-prova utilizado no ensaio de vida de gume pode ser melhor especificado como ferro fundido comum de baixa resistência em vez de ABNT FC-100, pois sua resistência mecânica está abaixo da especificada pela ABNT (ver item 4.3.4).

Visando a caracterização do material através de suas propriedades mecânicas e microestrutura em vez de caracterizá-lo simplesmente baseado em sua classificação, bem como para melhor compreensão do seu comportamento na usinagem, foram realizadas análise química, análise metalográfica, ensaio de tração e ensaio de dureza.

As amostras para caracterização do material foram extraídas de anéis restantes dos tubos usinados no ensaio de vida\*. Os anéis foram subdivididos em quatro regiões equidistantes ao longo de sua circunferência, onde foram feitos a análise metalográfica e os testes de dureza. O material restante entre estas regiões foi usado para confecção dos corpos-de-prova para ensaio de tração, conforme o esquema mostrado na figura 17.

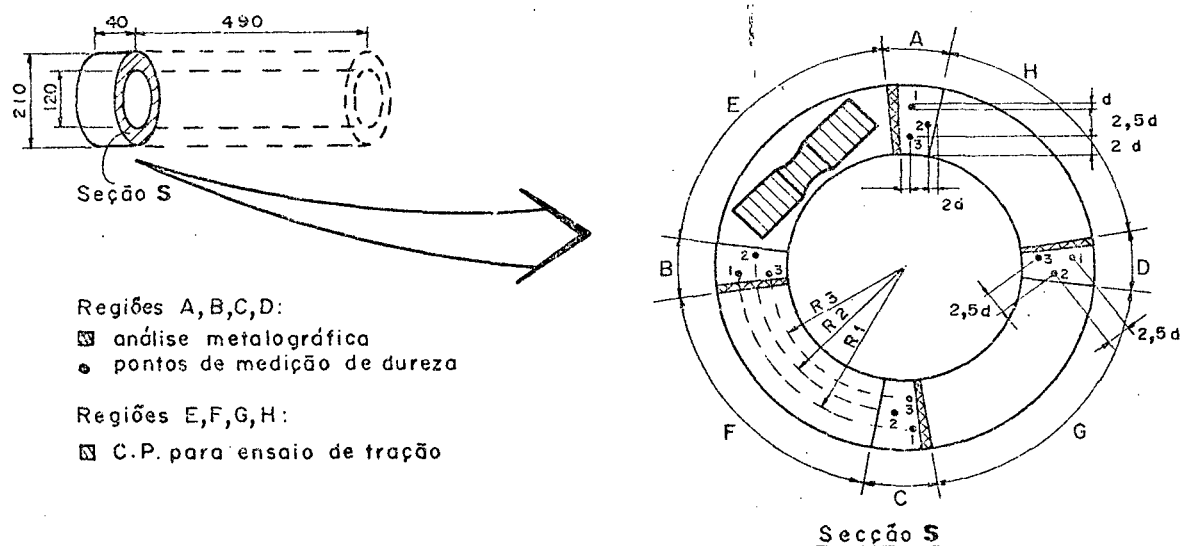


FIG. 17 - Amostras para caracterização do material.

\* O procedimento normal é caracterizar o material antes da usinagem dos corpos-de-prova, o que foi feito através da realização de pré-ensaios. A caracterização posterior a usinagem foi feita para melhor controle do ensaios de usinagem, através da análise do material de cada corpo-de-prova.

#### 4.3.1 - Composição química

A análise química foi feita, pelo fabricante do material, para cada corrida de metal na fundição dos corpos-de-prova. Os valores médios estão mostrados na tabela III.

C	Si	Mn	S	P
3,810 (0,062)*	2,140 (0,088)*	0,465 (0,078)*	0,120 (0,015)*	0,090

\* Desvio padrão

TABELA III - Composição química do material, % em peso.

#### 4.3.2 - Análise metalográfica

O material usado no ensaio de vida de gume foi analisado quanto a microestrutura através de toda a espessura da parede de dois corpos-de-prova entre dez, escolhidos aleatoriamente, sendo verificado se havia variação na microestrutura através de sua espessura. Constatada a homogeneidade da microestrutura e sabendo-se que todos os corpos-de-prova foram fabricados sob as mesmas condições, a análise metalográfica dos demais foi feita através de uma única amostra para cada corpo-de-prova, sendo que estas foram extraídas intercaladamente de posições internas, média e externa da parede dos mesmos. Foram analisadas quinze amostras.

As figuras 18, 19 e 20 mostram que:

- a microestrutura do material é constituída basicamente por lamelas de grafita tipo A e forma I\* em uma matriz predominantemente ferrítica;
- o material apresenta alta densidade de grafita com lamelas grosseiras de tamanhos variáveis entre os números 2, 3, 4 e 5\*, predominando os números 3 e 4. Ocorrem regiões com lamelas de grafita relativamente pequenas e bastante con-

---

\* Classificação segundo ASTM - American Society for Testing Materials.

- centradas e outras regiões com lamelas grandes e menos concentradas, com distribuição aleatória;
- a perlita apresenta-se bem distribuída, com tendência a formação em malha sobre um fundo ferrítico;
  - é significativa a presença de sulfetos de manganês e eutéticos fosforosos.

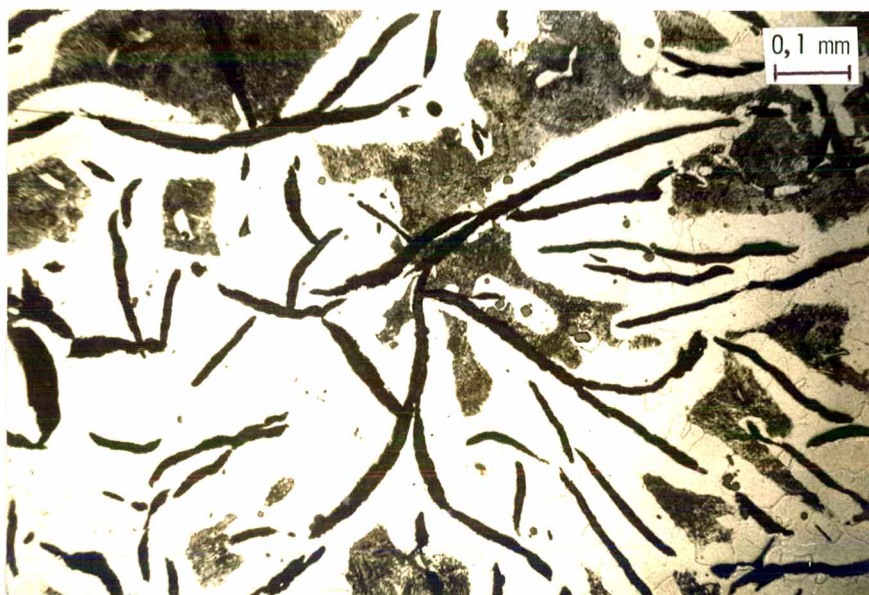


FIG. 18 - Micrografia do material, região interna da parede do cilindro (aumento: 100X, reativo: Nital 2%)



FIG. 19 - Micrografia do material, região interna da parede do cilindro (aumento: 100X, reativo: Nital 2%)





FIG. 20 - Micrografia do material, região externa da parede do cilindro (aumento: 25X, reativo: Nital 2%)

#### 4.3.3 - Ensaio de dureza

Para determinação da dureza Brinell do material, foi utilizada uma esfera de 10 mm de diâmetro com carga de 29450 N (3000 kgf) aplicada durante 30 segundos. Os pontos de medição foram distribuídos sobre a seção transversal dos corpos-de-prova, em quatro regiões e em três diâmetros diferentes, conforme a figura 17. Os resultados, em valores médios, e desvios padrão estão na tabela IV.

Seção do corpo-de-prova *				Raio do corpo-de-prova *		
A	B	C	D	R1	R2	R3
83,7 (6,5)**	81,8 (5,3)	82,4 (8,1)	80,9 (5,1)	80,5 (5,9)	84,7 (6,4)	84,2 (5,3)

\* De acordo com a figura 17

\*\* Desvio padrão, entre parêntesis

Média geral: 82,0 (6,1)

TABELA IV - Valores de dureza Brinell (HB) do material.

#### 4.3.4 - Resistência mecânica

A resistência mecânica do material foi verificada através do limite de resistência à tração em ensaios realizados com corpos-de-prova específicos para ensaio de tração, extraídos dos anéis restantes dos corpos-de-prova usados no ensaio de vida de gume. De cada anel era extraído um corpo-de-prova para ensaio de tração em diferentes posições ao longo de sua circunferência. A forma e dimensões destes corpos-de-prova estão indicados na figura 21.

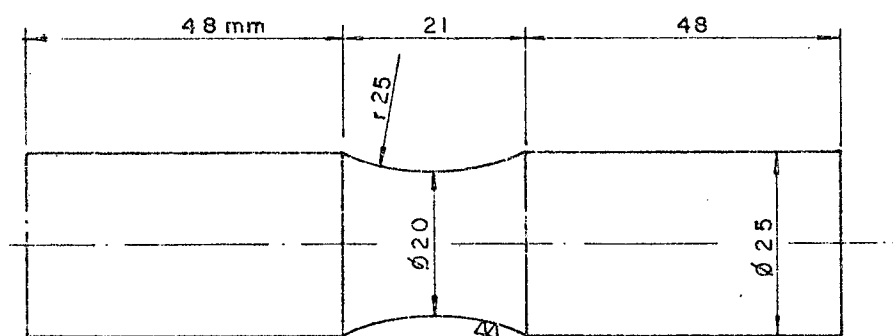


FIG. 21 - Corpo-de-prova para ensaios de tração.

O valor médio do limite de resistência a tração, para dez corpos-de-prova, foi de  $78,76 \text{ N/mm}^2$ , com desvio padrão de  $5,73 \text{ N/mm}^2$ .

#### 4.4 - Métodos e resultados parciais

##### 4.4.1 - Preparação do ensaio de vida de gume da ferramenta

O departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina adquiriu, através de acordo de cooperação técnica entre Brasil e República Federal da Alemanha, um conjunto de "software" do ADATU\*. Portanto, o termo "criação do ADATU" significa nada mais que a iniciação à obtenção, processamento e arquivamento de dados, referentes a usinagem dos materiais de peças, com ferramentas específicas mais utilizadas na indústria nacional (com isso abrangendo o maior número de usua-

\* Programas computacionais de processamento de dados e gerenciamento do ADATU.



rios), usando uma única metodologia de ensaio (ver capítulo 3).

O critério usado para a seleção do tipo de material usado neste trabalho foi que este tivesse aplicação prática em processos de usinagem. Aproveitando o convênio UFSC-WEG, foi solicitado o material ABNT FC-100 fundido em forma de tubos vazados, conforme item 4.3, na fundição da Eletromotores WEG S.A..

As condições de usinagem foram selecionadas para operações de torneamento externo longitudinal sem fluido de corte, baseadas em indicações de fabricantes de ferramentas (27, 28). Para proporcionar condições de superfície usinada desde acabamento até desbaste, a faixa de avanço está entre 0,1 e 1,0 mm/rot e a faixa de profundidade de corte entre 0,5 e 10,0 mm. Porém avanços acima de 0,5 mm/rot e/ou profundidades de corte acima de 5,0 mm, mantendo um índice de esbeltez adequado (10), exigiriam um consumo de material excessivo, bem como os avanços abaixo de 0,2 mm/rot, para o material em questão, não daria acabamento superficial adequado, devido sua própria microestrutura (29). Ficam assim selecionados quatro valores de avanço: 0,25 - 0,30 - 0,40 - 0,50 mm/rot e três valores de profundidade de corte: 2,5 - 3,5 - 5,0 mm caracterizando uma variação de superfície usinada entre semi-acabamento e desbaste leve.

A pastilha de corte foi escolhida considerando-se o tipo de material e o processo de usinagem, bem como as condições de avanços, profundidades de corte e velocidades de corte (campo de aplicação). A classe ABNT K10 foi considerada a mais adequada utilizando-se velocidade de corte entre 135 e 220 m/min para quinze minutos de vida do gume (27). Baseado neste intervalo e na série geométrica de números normalizados R20 foram estabelecidos seis valores de velocidade de corte: 140 - 160 - 180 - 200 - 224 - 250 m/min. As ferramentas bem como as pastilhas de fixação mecânica estão especificados no item 4.1.1.

Com as condições de usinagem estabelecidas, fez-se a combinação das mesmas de forma a representar todo campo de operação entre semi-acabamento e desbaste leve, mantendo a relação profundidade de corte/avanço dentro de limites especificados no item 3.4. O conjunto de combinações selecionadas neste trabalho (tabela V), possibilita analisar a influência da repetição de condições de usinagem nos resultados do ensaio de vida de gume (utilização da equação de Taylor simples) e, desta análise, concluir qual o melhor procedimento para selecionar o conjunto de combinações de condições de usinagem para determinação da equação de Taylor expandida.

Número da Combinação	Velocidade de corte, m/min	Avanço, mm/rot	Profundidade de corte, mm
1	250	0,25	2,50
2	224	0,25	2,50
3	224	0,30	2,50
4	200	0,25	2,50
5	200	0,40	2,50
6	180	0,25	2,50
7	180	0,30	2,50
8	180	0,50	5,00
9	160	0,25	2,50
10	160	0,50	5,00
11	140	0,40	3,50

TABELA V - Conjunto de combinações de condições de usinagem.

O procedimento para executar o ensaio deve estar previamente definido, não ficando dúvidas quanto ao que medir e como fazê-lo. Após determinadas todas as combinações (tabela V), definiu-se o critério de fim de vida de gume que, com base nas especificações do item 3.5 e considerando que o material da peça pertence a classe de metais ferrosos de alto índice de usinabilidade, foi adotado o desgaste médio de flanco  $VB=0,40$  mm.

#### 4.4.2 - Ensaio de vida de gume

O ensaio de vida de gume foi realizado em duas etapas (conforme item 3.9), ou seja, o pré-ensaio e o ensaio principal.

O procedimento do pré-ensaio consistiu na realização das seguintes etapas:

- A - seleção de três combinações de condições de usinagem que representassem aquelas definidas para o ensaio principal; as combinações selecionadas foram as de número 2, 5 e 10 da tabela V;
- B - estimativa da quantidade de corpos-de-prova para pré-ensaio;
- C - aquisição do material junto ao fornecedor;
- D - realização do pré-ensaio;
- E - determinação do comportamento de desgaste da ferramenta: gráfico de desgaste x tempo;

- F - realização de ensaios para caracterização do material dos corpos-de-prova: análise metalográfica, medições de dureza e ensaio de tração;
- G - estimativa da quantidade de corpos-de-prova para o ensaio principal;
- H - determinação do número mínimo de medições de desgaste para realização do ensaio principal: teste de Kolmogorov-Smirnov,

Os procedimentos e os resultados das etapas acima encontram-se no Apêndice II.

O ensaio principal de vida de gume teve início após ter-se feito seu planejamento e preparação, conforme o item 4.4.1, e após obtidos os resultados do pré-ensaio (apêndice II).

Para obter informações seguras sobre o desgaste de gume, u sinava-se o corpo-de-prova durante intervalos de tempo previamente definidos. Após cada intervalo de tempo de usinagem, devidamente cronometrado, era medido o desgaste de flanco da pastilha. Considerava-se encerrado o ensaio, para cada combinação de condições de usinagem, quando o desgaste atingisse o valor do critério de fim de vida de gume para um tempo acumulado inferior a 50 minutos, caso contrário o ensaio terminava neste tempo.

O controle da velocidade de corte era feito através do valor da voltagem indicada no multímetro digital. A redução do diâmetro do corpo-de-prova, medido a cada passe de usinagem, exigia que se alterasse a rotação da árvore da máquina para que fosse mantida a velocidade de corte (equação 16). Isto significava aumentar a rotação alterando o valor da voltagem indicada no multímetro digital segundo as equações 17 e 18. Estes valores foram mantidos constante durante a usinagem em cada diâmetro.

A fixação dos corpos-de-prova na máquina-ferramenta foi feita por meio de place e de contra-ponta rotativo, com auxílio de um tam pão em ajuste prensado em uma das extremidades. Foi removida a superfície bruta de fusão de todos os corpos-de-prova.

Para evitar o acúmulo de partículas sobre a sede da pastilha, a cada vez que esta era retirada para uma medição de desgaste, se fa zia necessária a limpeza da sede para evitar variações nos ângulos de tra balho da ferramenta por assentamento indevido da pastilha.

Uma inspeção no arranjo de ensaio (instrumentos, porta-ferramenta, contra-ponta, etc.) era feita a cada troca de corpo-de-prova.

Os resultados obtidos, durante a realização do ensaio, para cada combinação de parâmetros ensaiada, eram comparados com aqueles obtidos no pré-ensaio com combinação de parâmetros semelhante para que assim, no caso de defasagem significativa dos resultados, era possível verificar a necessidade de repetição do ensaio.

O conjunto de valores de desgaste de flanco VB da pastilha de corte, medidos em tempos pré-determinados, possibilita analisar a evolução do desgaste para cada combinação de condições de usinagem e seu comportamento relativo entre combinações diferentes e, portanto, a determinação da vida de gume.

A evolução de VB com o decorrer do tempo de usinagem, geralmente apresenta três comportamentos característicos. No início do corte VB aumenta rapidamente, passando a uma fase intermediária com desgaste relativamente pequeno, e posteriormente volta a crescer com intensidade cada vez maior. As três fases estão representadas nos gráficos abaixo (figuras 22 e 23), pelos campos I, II e III, respectivamente.

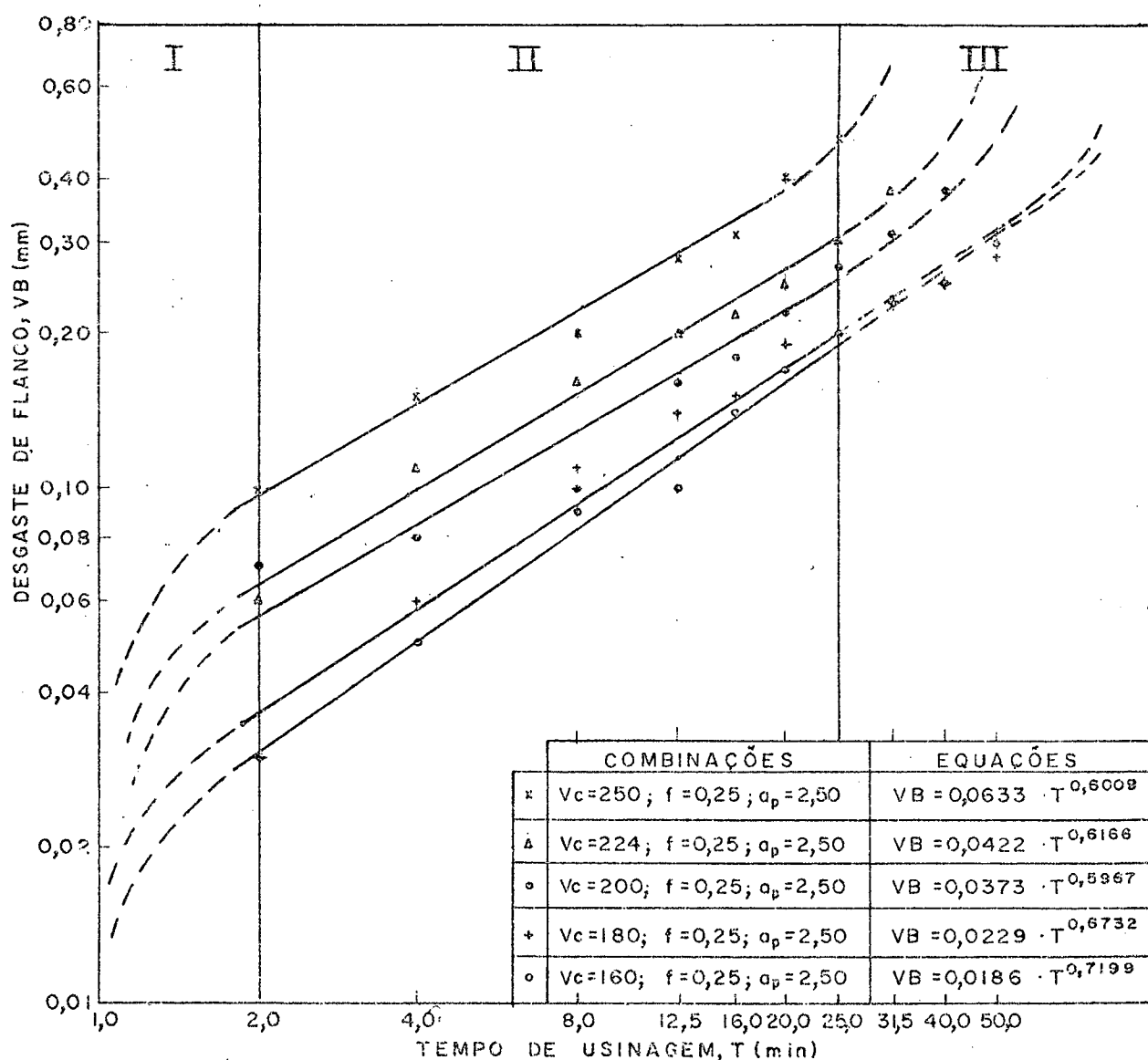


FIG. 22 - Comportamento do desgaste VB, para as combinações 1, 2, 4, 6 e 9.

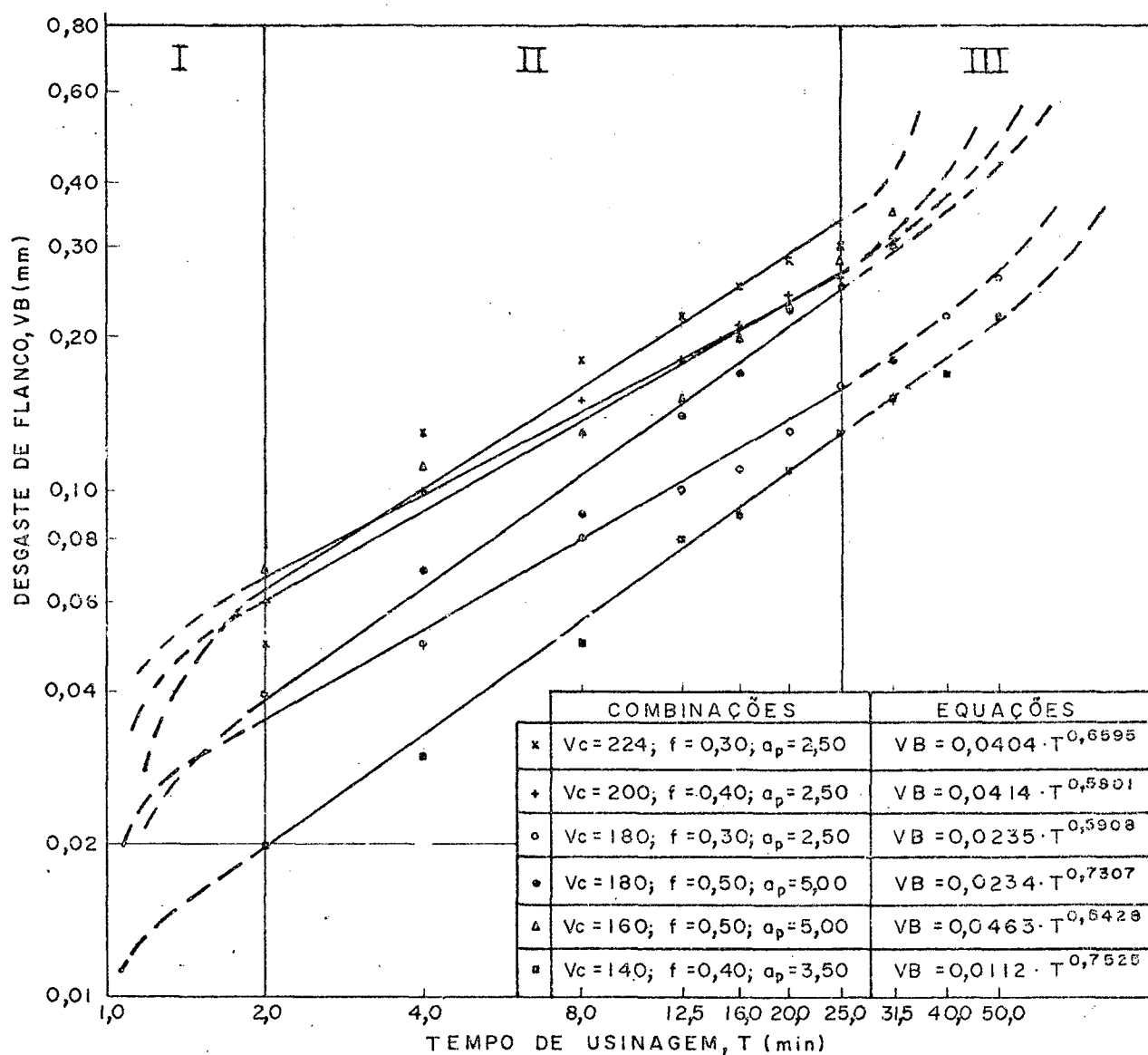


FIG. 23 - Comportamento do desgaste VB, para as combinações 3,5,7,8,10 e 11

Na fase intermediária (campo II) é possível ajustar a evolução do desgaste a uma reta definida por:

$$y = A \cdot x^B \quad (19)$$

Devido ao número relativamente grande de combinações de usinagem, foram traçados dois gráficos (em escala log-log) desgaste x tempo de usinagem (figuras 22 e 23), da seguinte forma:

- um gráfico contendo as curvas correspondentes as combinações com valores de avanços e profundidades de corte de 0,25 mm/rot e 2,50 mm, respectivamente;
- outro gráfico contendo as curvas correspondentes as demais combinações.

Durante o ensaio, procurou-se prolongar os tempos de usinagem para aumentar o desgaste quando este evoluía muito lentamente, tentando-se atingir o critério  $VB = 0,30$  mm para fim de vida de gume e evitar posteriores extrapolações. Este critério foi usado para todas as combinações, em lugar do critério previamente escolhido ( $VB = 0,40$  mm), porque o desgaste apresentou um crescimento relativamente lento na maioria das combinações usadas e um critério maior elevaria muito o consumo de material. Com isso, algumas curvas (figuras 22 e 23) apresentam maior número de pontos que outras (recomenda-se entre 6 e 8 e no máximo 10, conforme item 3.9).

Para determinação da equação de Taylor expandida, introduziu-se no programa gerador de dados do ADATU (14) os dados relativos ao material da peça, fatores de correção para o cálculo do avanço, dados relativos ao material da ferramenta e os resultados do ensaio de vida de gume (Apêndice IV).

Para verificar a influência do uso repetido de velocidades de corte, avanços e profundidades de corte na determinação da vida de gume, fez-se o processamento dos resultados com diferentes conjuntos das combinações de condições de usinagem contidas na tabela V, ou seja:

- Conjunto I : Composto pelas combinações cujos valores de avanço e profundidade de corte são, respectivamente, iguais a 0,25 mm/rot e 2,50 mm, portanto, as combinações 1, 2, 4, 6 e 9;
- Conjunto II : Composto por todas as combinações utilizadas no ensaio de vida de gume;
- Conjunto III : Composto por combinações com velocidades de corte diferentes, sendo que a repetição de valores de avanço e profundidade de corte é pequena, portanto as combinações 1, 3, 5, 8, 10 e 11.

Para cada conjunto obteve-se, como resultado do processamento, os valores dos expoentes e constante da equação de vida de gume.

Aplicando-se o critério de fim de vida de gume ( $VB=0,30$ mm) nas equações das curvas de desgaste X tempo de usinagem (figura 22) correspondentes às combinações com avanço igual a 0,25 mm/rot e profundidade de corte igual a 2,50mm, obteve-se, para cada velocidade de corte destas combinações, a respectiva vida de gume. A estes pares de valores ajustou-

se uma reta (modelo da equação 19), que representa a equação de vida de gume da ferramenta para o conjunto I (tabela VI).

A determinação da equação de Taylor expandida envolve um sistema de cinco equações e cinco incógnitas (25), sendo inadequado para ser solucionado sem auxílio de computador. Com esta finalidade, para os conjuntos II e III, utilizou-se o programa gerador de dados do ADATU (14) para determinar as equações de Taylor expandidas (tabela VI).

Conjunto	Equações
I	$v_c = 592 \cdot T^{-0,3197}$
II	$v_c = 781,17 \cdot f^{0,0056} \cdot a_p^{-0,2417} \cdot T^{-0,2166} \cdot VB^{0,3284}$
III	$v_c = 529,11 \cdot f^{0,1807} \cdot a_p^{-0,1440} \cdot T^{-0,1994} \cdot VB^{0,2992}$

TABELA VI - Equações de vida de gume (equações de Taylor)

Nas equações dos conjuntos II e III foi isolada a variável T e a elas foram aplicados os mesmos valores de f,  $a_p$  e VB utilizados na equação do conjunto I. Assim procedendo, todas as equações passaram a ter a mesma configuração e, portanto, são passíveis de comparação. A tabela VII contém as equações de vida de gume aplicadas para  $f = 0,25$  mm/rot,  $a_p = 2,50$  mm e  $VB = 0,30$  mm.

Conjunto	Equações Aplicadas
I	$T = 4,6950 \cdot 10^8 \cdot v_c^{-3,1279}$
II	$T = 1,2672 \cdot 10^{12} \cdot v_c^{-4,6168}$
III	$T = 1,3563 \cdot 10^{13} \cdot v_c^{-5,0150}$

TABELA VII - Equações de vida de gume dos conjuntos I, II e III aplicadas para  $f = 0,25$  mm/rot,  $a_p = 2,50$  mm e  $VB = 0,30$  mm.

A comparação do comportamento das equações da tabela VI foi feita calculando-se, através de cada equação da tabela VII, os valores de T correspondentes às velocidades de corte  $v_c = 160, 180, 200, 224$  e  $250$  m/min. O resultado do processamento dos dados dos conjuntos I, II e III definiram o traçado das "curvas" da figura 24.

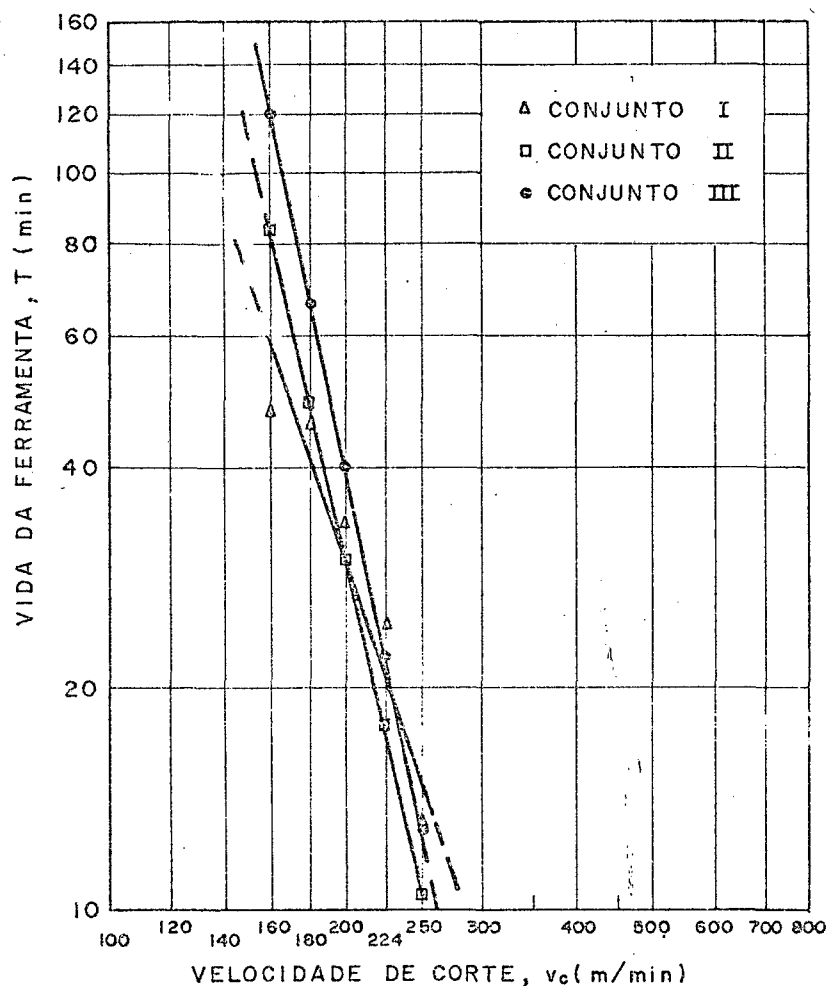


FIG. 24 - "Curvas" de vida de gume dos conjuntos I, II e III, aplicadas para  $f=0,25$  mm/rot,  $a_p=2,50$  mm e  $VB=0,30$  mm.

Pela análise da figura 24, observa-se que as curvas de vida de gume correspondentes aos conjuntos I e III apresentam-se bastante defasadas, principalmente em velocidades de corte menores que 200 m/min. Observa-se, ainda, que a curva correspondente ao conjunto II apresenta um comportamento intermediário, o que leva a crer que o comportamento da equação de Taylor expandida se aproxima da equação de Taylor simples a medida que aumenta a repetição de avanços e profundidades de corte. Na faixa de velocidades de 200 a 250 m/min, as três "curvas" apresentam comportamentos discretamente defasados, sugerindo que nesta faixa a influência da velocidade de corte sobre o desgaste da ferramenta, em relação ao avanço e profundidade de corte, é superior quando comparado com velocidades infe



riores a 200 m/min.

Com base nas colocações acima, optou-se por analisar o comportamento das equação de Taylor expandidas utilizando-se conjuntos de combinações de condições de usinagem que repetissem cada vez menos os valores de avanço e profundidade de corte. Para isso, foram formados os seguintes conjuntos:

- conjunto IV: composto pelas combinações 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 e 11 (excluída a combinação 6\*);
- conjunto V: composto pelas combinações 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10 e 11 (excluídas 6 e 9);
- conjunto VI: composto pelas combinações 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10 e 11 (excluídas 6, 7 e 9);
- conjunto VII: composto pelas combinações 1, 3, 4, 5, 8, 10 e 11 (excluídas 2, 6, 7 e 9).

Para obtenção das equações de Taylor expandidas referentes aos conjuntos IV, V, VI e VII, foi seguido o mesmo procedimento usado para os conjuntos II e III. Os resultados estão na tabela VIII.

Conjuntos	Equações
IV	$v_c = 773,15 \cdot f^{-0,0022} \cdot a_p^{-0,2371} \cdot T^{-0,2166} \cdot v_B^{0,3296}$
V	$v_c = 540,36 \cdot f^{-0,1374} \cdot a_p^{-0,1720} \cdot T^{-0,1865} \cdot v_B^{0,2881}$
VI	$v_c = 560,52 \cdot f^{-0,1356} \cdot a_p^{-0,1607} \cdot T^{-0,1975} \cdot v_B^{0,3006}$
VII	$v_c = 588,56 \cdot f^{-0,1108} \cdot a_p^{-0,1716} \cdot T^{-0,2002} \cdot v_B^{0,3042}$

TABELA VIII - Equações de vida de gume (equações de Taylor).

\* O critério adotado para escolha da combinação eliminada, pela ordem decrescente de importância, foi:

- a) Ter condições de usinagem  $f=0,25$  mm/rot e  $a_p=2,50$  mm;
- b) Ter apresentado, durante o ensaio, um comportamento de desgaste confuso entre as combinações (ver figura 23);
- c) Ter velocidade de corte já usada em outra combinação.

Da mesma forma que para os conjuntos II e III, adotou - se nas equações da tabela VIII os valores de  $f=0,25$  mm/rot,  $a_p=2,50$  mm e  $VB=0,30$  mm, para que estas tivessem termos de comparação. Obteve-se, assim, as equações mostradas na tabela IX, com representação gráfica na figura 25.

Conjunto	Equações aplicadas
IV	$T = 1,2865 \cdot 10^{12} \cdot v_c^{-4,6168}$
V	$T = 8,3422 \cdot 10^{13} \cdot v_c^{-5,3619}$
VI	$T = 1,6243 \cdot 10^{13} \cdot v_c^{-5,0633}$
VII	$T = 1,0783 \cdot 10^{13} \cdot v_c^{-4,9950}$

TABELA IX - Equações de vida de gume dos conjuntos IV, V, VI e VII, aplicadas para  $f=0,25$  mm/rot,  $a_p=2,50$  mm e  $VB=0,30$  mm.

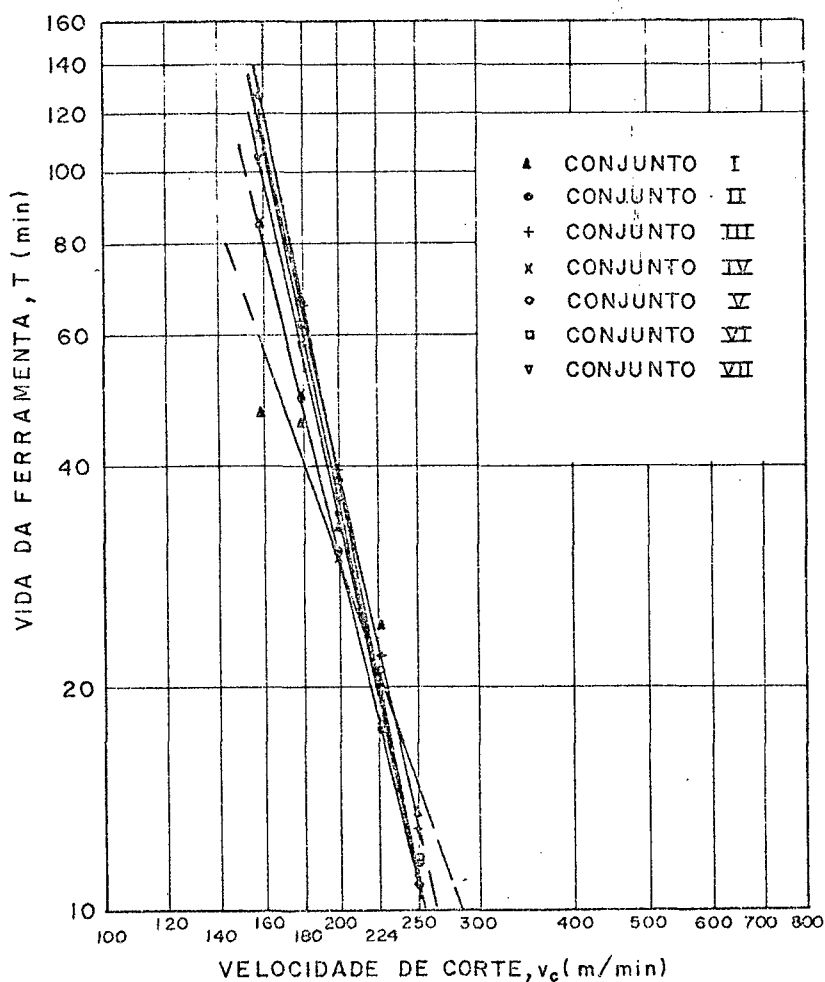


FIG. 25 - "Curvas" de vida de gume dos conjuntos IV, V, VI e VII, aplicadas para  $f=0,25$  mm/rot,  $a_p=2,50$  mm e  $VB=0,30$  mm.

Pela análise das "curvas" da figura 25 e das equações de Taylor expandidas, tabelas VI e VIII, pode-se fazer as seguintes observações:

- Há uma certa tendência do comportamento da equação de Taylor expandida se aproximar da equação de Taylor simples a medida que aumenta o número de repetições de condições de usinagem nos conjuntos de combinações que a determinaram.
- O valor do expoente do avanço (ECONST) nas equações de Taylor expandidas obtidas pelos conjuntos II e IV (ou seja, onde a repetição de condições de usinagem era maior) era praticamente nulo, significando, certa independência da variação do avanço na determinação da vida de gume, o que não corresponde a realidade. Especificamente para o conjunto II, o expoente ECONST tem sinal positivo significando que a vida aumentaria se o avanço fosse maior, o que é uma incoerência. Para os conjuntos III, V, VI e VII os valores de ECONST apresentaram certa semelhança e coerência\*.
- Os expoentes FCONST da profundidade de corte, GCONST da vida de gume e HCONST do desgaste de flanco apresentaram-se semelhantes nas diversas equações e seus valores estão condizentes com valores encontrados na literatura (8).

Com base nas observações acima e considerando que:

- A vida de gume é melhor representada pela equação de Taylor expandida que pela equação simples, pois a primeira pondera quantitativamente as variações de avanços, profundidades de corte e desgaste da ferramenta;
- A influência do avanço, no processo de usinagem, é maior que a influência da profundidade de corte, portanto o valor absoluto do expoente ECONST, na equação de Taylor expandida, deve ser maior que FCONST;
- O expoente ECONST da equação de Taylor expandida, bem como os demais expoentes e a constante, é utilizado na determinação automática das condições de usinagem para máquinas-ferramentas com comando numérico;

Conclui-se que a equação de Taylor que melhor representa o ensaio de vida de gume, neste trabalho, é aquela determinada pelo conjunto III, ou seja:

$$v_c = 529,11 \cdot f^{-0,1807} \cdot a_p^{-0,1440} \cdot T^{-0,1994} \cdot v_B^{0,2992} \quad (20)$$

---

\* Valores encontrados na literatura (8) reforçam a observação feita no texto.

#### 4.4.3 - Ensaio para determinação da força específica de corte ( $k_{c1.1}$ ) e expoente ( $1-m_c$ ) da equação de Kienzle.

O ensaio para determinação de  $k_{c1.1}$  e  $1-m_c$  consistiu em medições da componente  $F_c$  da força de usinagem utilizando-se diferentes valores de avanços e mantendo-se fixas a velocidade de corte\* e a profundidade de corte (conforme item 3.6). A ferramenta de corte (material da pastilha e geometria de corte) foi da mesma classe usada no ensaio de vida de gume. Para cada valor de avanço utilizado, fazia-se cinco leituras de  $F_c$  (em intervalos de trinta segundos), tirando-se o valor médio (ver Apêndice IV).

As medições de  $F_c$  foram feitas sob controle de desgaste da pastilha de corte, sendo que o valor medido de desgaste de flanco (VB) não foi nunca superior a 0,1 mm sob pena do ensaio ser refeito com um tempo de usinagem reduzido em relação ao anterior. Para cada condição de avanço foi usado um novo gume da pastilha.

As medições de força principal de corte  $F_c$  para determinação da força específica de corte  $k_{c1.1}$  e expoente  $1-m_c$ , para cada condição de avanço estabelecida, realizaram-se intercaladamente aos ensaios de vida de gume, ou seja, após a utilização de cada combinação de condições de usinagem.

Como a profundidade de corte usada foi  $a_p = 2,50$  mm, e o ângulo de posição do gume principal da pastilha foi  $\chi = 75^\circ$ , pela equação 10, obteve-se a largura de corte  $b = 2,59$  mm.

Com auxílio da equação 11, para os avanços  $f$  usados obteve-se os respectivos valores de espessura de corte  $h$  que, juntamente com os valores medidos de força principal de corte  $F_c$ , montou-se a tabela X.

---

\* A velocidade de corte  $v_c = 160$  m/min foi escolhida dentro da faixa de velocidades usadas no ensaio de vida de gume representando um valor relativamente baixo dentro desta faixa (baixo desgaste da pastilha). Esta escolha foi baseada no fato de que a força de corte mantém-se praticamente constante com a variação da velocidade de corte (o que foi confirmado experimentalmente neste trabalho).

f (mm/rot)	h (mm)	F <sub>c</sub> (N)	F <sub>c</sub> /b (N/mm)
0,10	0,10	304	117
0,16	0,15	453	175
0,25	0,24	574	222
0,40	0,39	781	302
0,63	0,61	1190	460
1,00	0,97	1759	680

(v<sub>c</sub> = 160 m/min ; a<sub>p</sub> = 2,50 mm ; X = 75° ; γ = -5° )

TABELA X - Dados para determinação de k<sub>cl.1</sub> e 1-m<sub>c</sub>.

Aplicando-se logarítmos nos dois lados da equação 12, ob -  
tém-se a equação de uma reta, ou seja:

$$\ln \left( \frac{F_c}{b} \right) = \ln k_{cl.1} + (1-m_c) \ln h \quad (21)$$

Adotando-se o método de regressão linear para os pares de valores de h e F<sub>c</sub>/b (tabela X), obteve-se a seguinte equação:

$$\ln \left( \frac{F_c}{b} \right) = 6,4987 + 0,7471 \ln h \quad (22)$$

A equação 22 corresponde a reta representada no gráfico da figura 26.

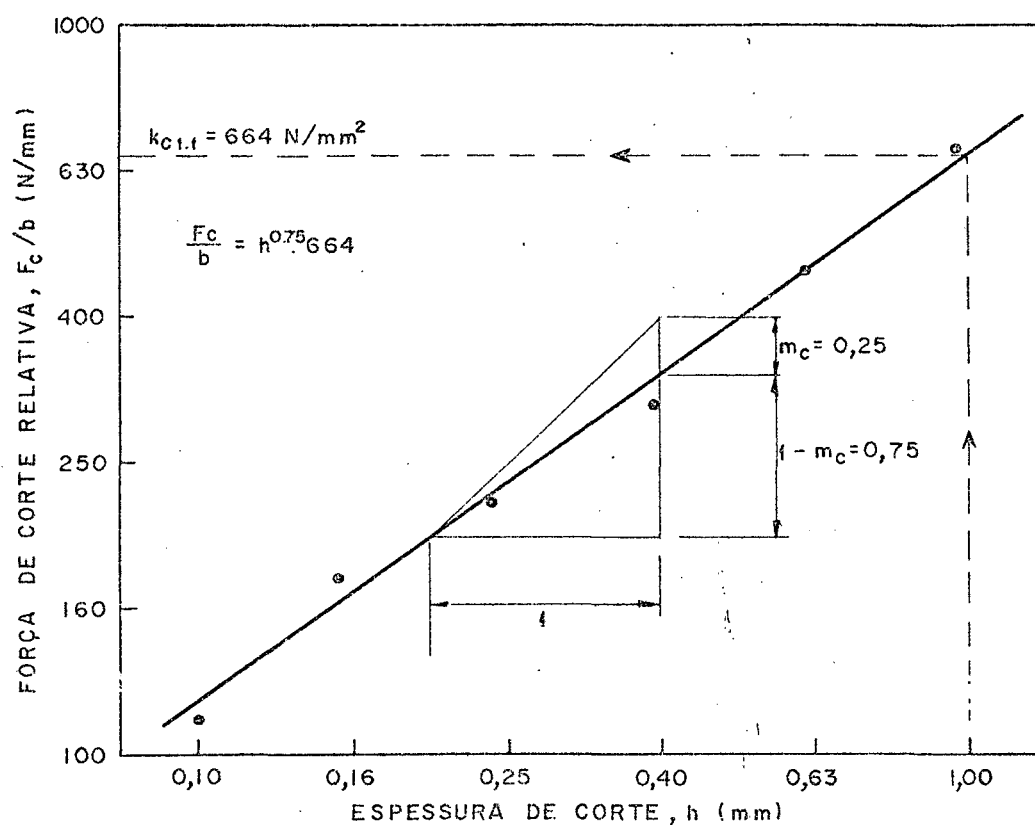


FIG. 26 - Determinação gráfica de  $k_{cl.1}$  e  $1-m_c$ .

A força específica de corte  $k_{cl.1}$  corresponde ao valor de  $F_c/b$  para  $h = 1 \text{ mm}$ , e o expoente  $1-m_c$  corresponde a inclinação da reta (conforme item 3.6), portanto tais valores foram obtidos através da equação 22 (e graficamente pela figura 26), resultando:

$$k_{cl.1} = 664 \text{ N/mm}^2$$

$$1-m_c = 0,75$$

#### 4.4.4 - Teste de funcionamento do ADATU na determinação automática de condições de usinagem para tornos com comando numérico.

O teste de funcionamento consistiu na utilização de dados armazenados no ADATU, que foram requeridos na fabricação de uma determinada peça em torno com comando numérico, cujas condições de usinagem foram determinadas automaticamente pelo programa de processamento tecnológico do sistema de programação EXAPT 2\*.

##### a) Desenho da peça

A peça foi projetada para fins de teste, objetivando-se utilizar parte do potencial de automação do sistema EXAPT 2 em uma única peça, portanto, foi desconsiderado o fator utilização prática da peça.

O desenho da peça está representado na figura 27, abaixo.

##### b) Programa da peça

O programa da peça foi elaborado com uma sequência de declarações codificadas em linguagem de programação EXAPT 2 que, em conjunto, representam as informações necessárias para a confecção automatizada da peça (ver item 2.3.1).

No Apêndice III tem-se a listagem do programa da peça correspondente ao desenho da figura 27.

##### c) Dados arquivados

Os dados necessários para o processamento do programa da peça, foram inseridos nos seus respectivos arquivos através de um programa de computador para gerenciamento de dados (16), do sistema EXAPT 2. A inserção dos dados no computador foi feita com auxílio de fichas de formato pré estabelecido, mostradas no Apêndice III.

Os dados arquivados, requeridos para a confecção da peça da figura 27, foram extraídos do ADATU, do arquivo de dados de máquinas-ferramentas e do arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas, res

---

\* Os dados contidos no arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas e no arquivo de dados de máquinas-ferramentas foram igualmente requeridos durante o processo de confecção da peça.

pectivamente (Apêndice III).

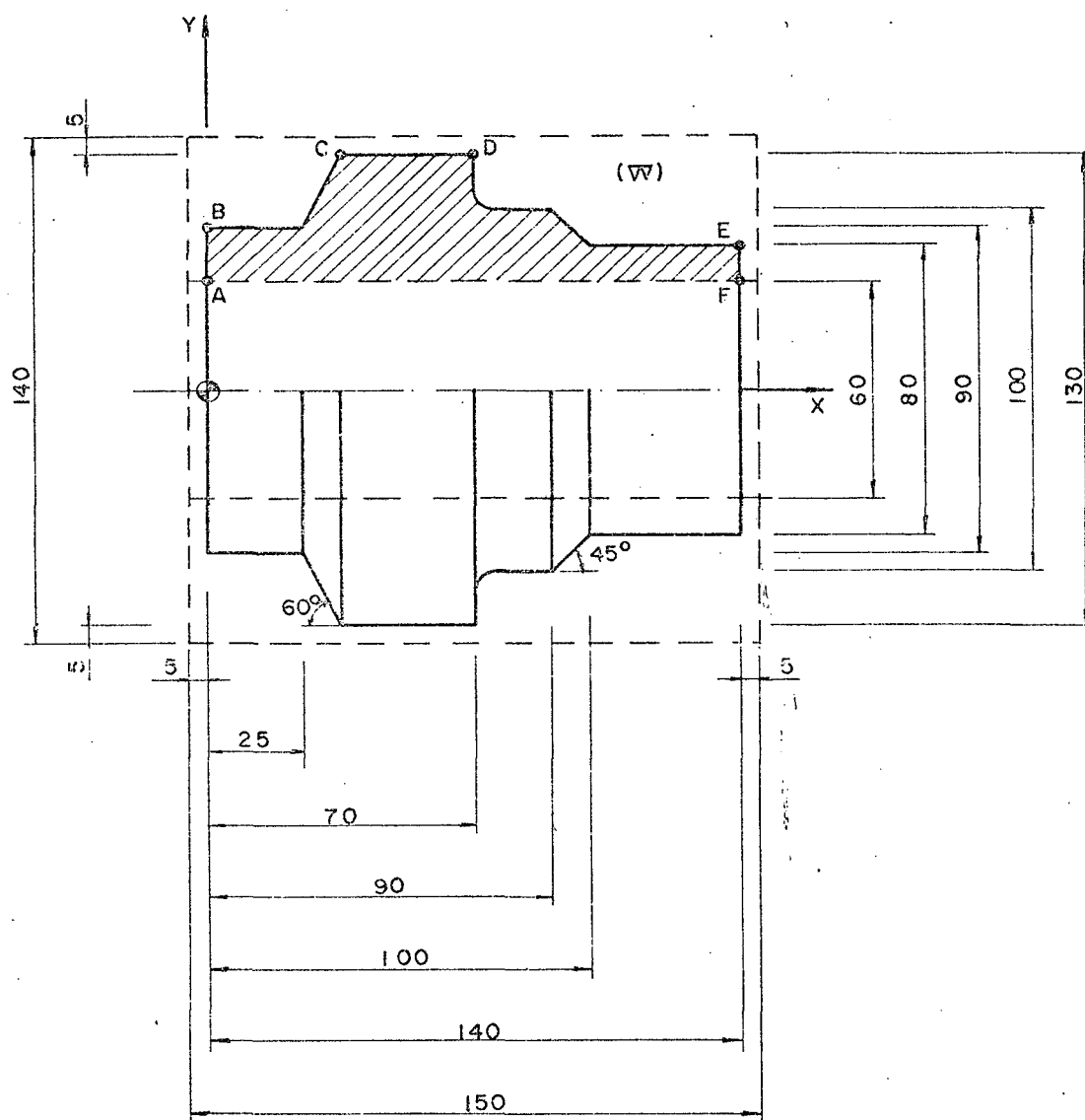


FIG. 27 - Desenho da peça.

#### d) Sistemas de coordenadas

Os parâmetros geométricos referentes à máquina-ferramenta, peça, ferramenta e fixação da peça foram definidos nos respectivos sistemas de coordenadas (independentes entre si) que, relacionados, permitiram o cálculo do posicionamento da ferramenta em relação à peça e sua fixação na máquina, incluindo testes para evitar eventuais colisões da ferramenta.

No Apêndice III estão ilustrados os sistemas de coordenadas concatenados, referentes aos componentes\* utilizados neste trabalho.

\* Máquina-ferramenta, peça e ferramenta de corte.



#### e) Resultado do processamento

O resultado do processamento foi constituido pelo conjunto de valores formado pelos dados de entrada de algumas declarações do programa da peça, pelos dados contidos em arquivos e pelos valores calculados pelo processador EXAPT 2. Este conjunto de valores, que representa o "output" do processador e também o "input" do pós-processador, foi emitido com formato codificado conforme a linguagem de programação utilizada, como pode ser visto na listagem mostrada no Apêndice III.

#### f) Resultado do pós-processamento

Os valores resultantes do processamento, de acordo com o item anterior, foram emitidos em linguagem codificada pelo sistema de programação utilizado, no caso o EXAPT 2. Porém, na forma que estes valores se apresentavam não era possível utilizá-los no comando da máquina-ferramenta NC. Antes, era necessário que se fizesse a compilação e a adaptação dos mesmos à máquina que confecciona a peça. Isto foi feito por um programa, compatível com a máquina a ser usada, comumente chamado de pós-processador.

O resultado do pós-processamento, referente à peça da figura 27, está mostrado no Apêndice III.

#### g) Controle gráfico do processo de usinagem da peça

Os valores resultantes do processamento do programa da peça determinaram as condições geométricas e tecnológicas de usinagem, entre as quais estão os contornos da peça bruta e acabada e a distribuição dos passes de corte. Como estes valores representam pontos coordenados em um sistema cartesiano, pode-se traçar graficamente os percursos das ferramentas, na confecção da peça.

Os gráficos apresentados abaixo representam as etapas de confecção da peça.

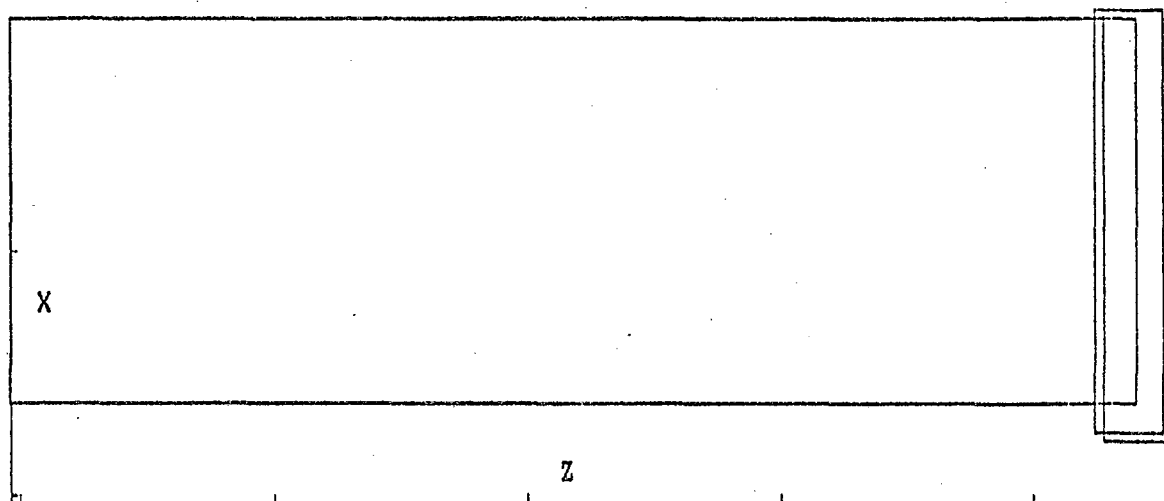


FIG. 28 - Operações de faceamento em desbaste e acabamento (1ª fixação).

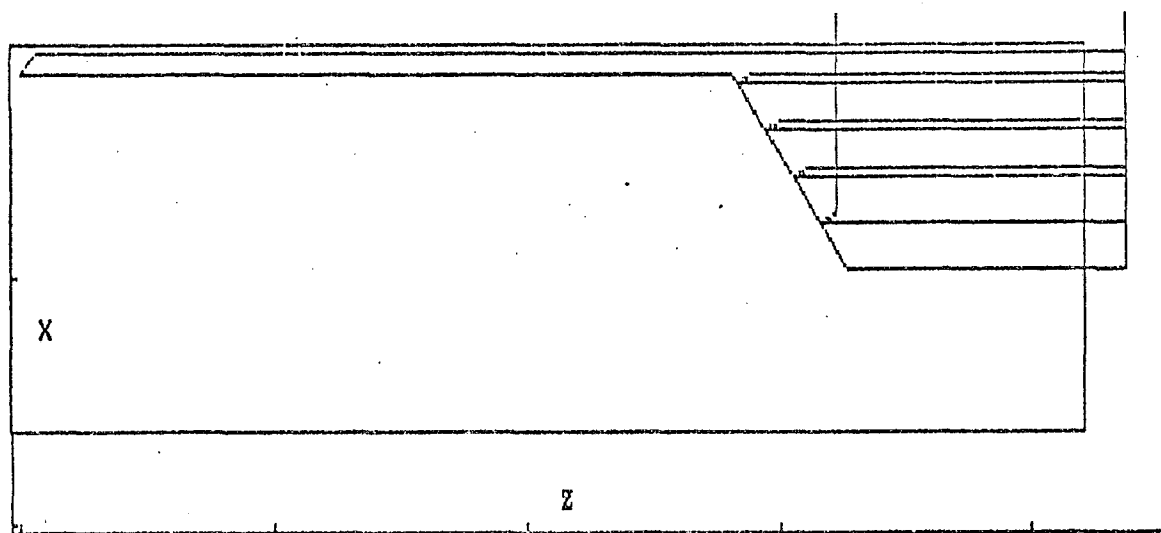


FIG. 29 - Operação de torneamento longitudinal em desbaste (1ª fixação).

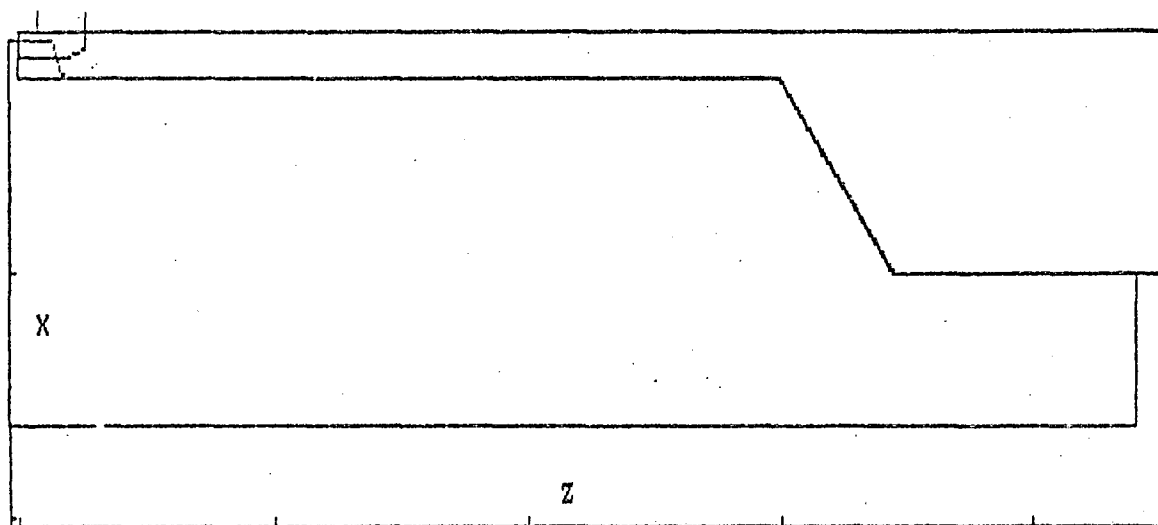


FIG. 30 - Operação de acabamento (1ª fixação).

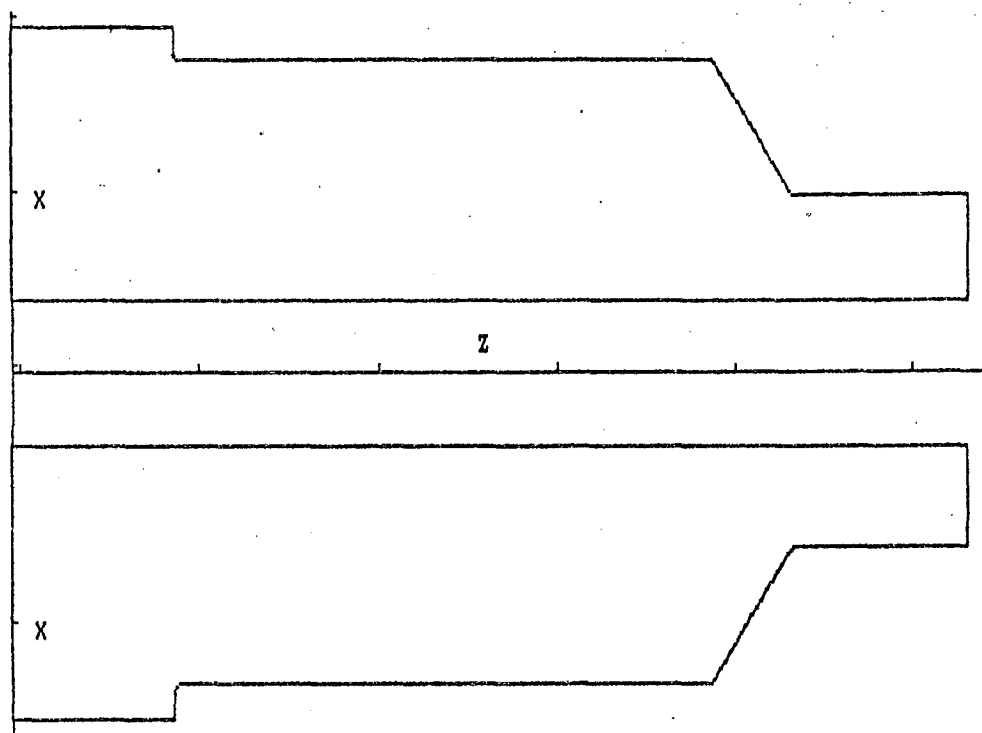


FIG. 31 - Contorno da peça após operações com 1ª fixação.

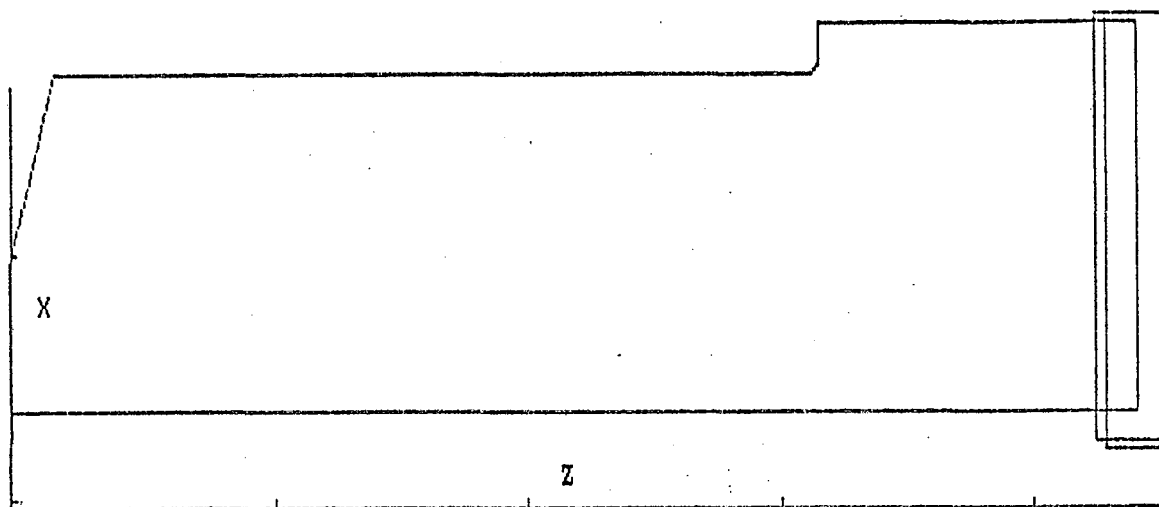


FIG. 32 - Operações de faceamento em desbaste e acabamento (2ª fixação).

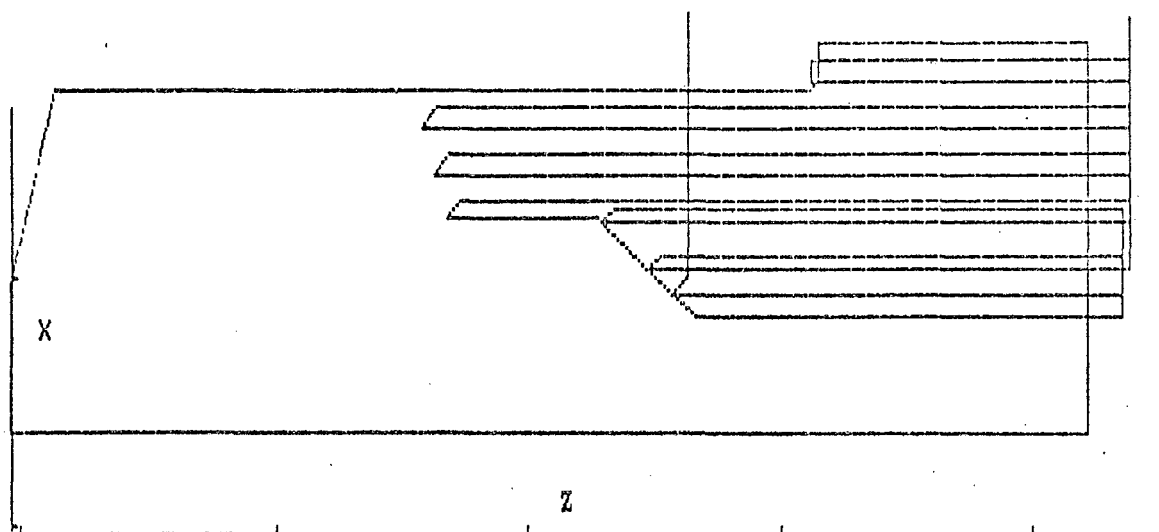


FIG. 33 - Operação de torneamento longitudinal em desbaste (2ª fixação).

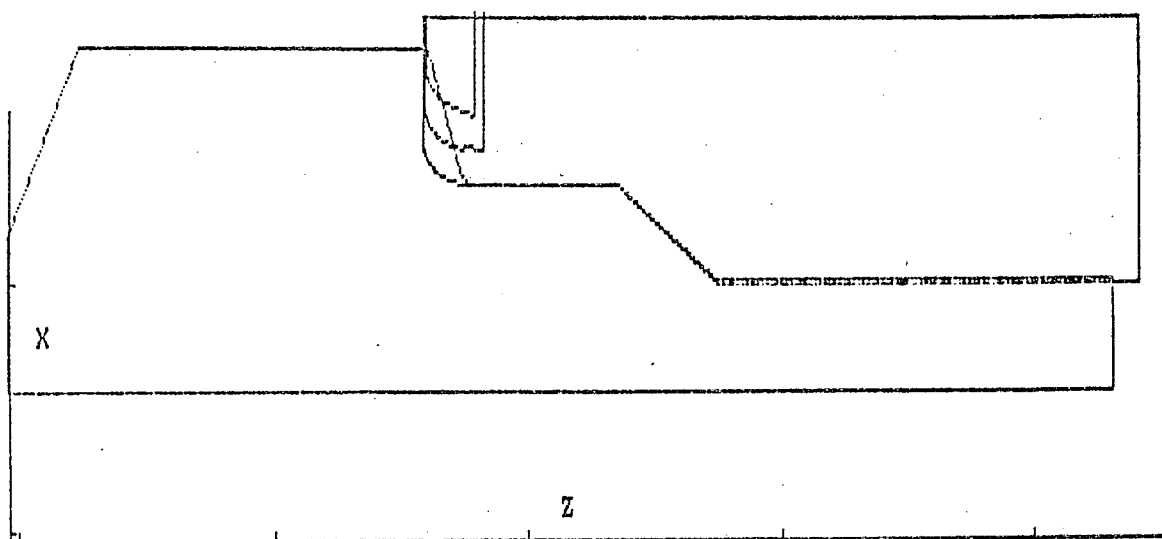


FIG. 34 - Operação de acabamento (2ª fixação).

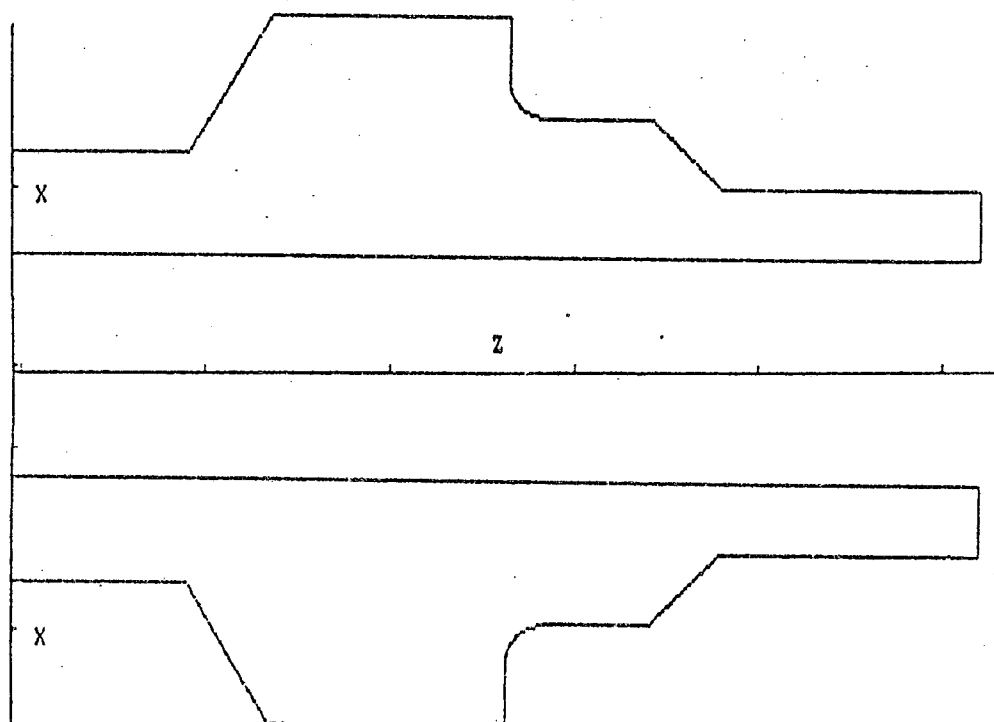


FIG. 35 - Contorno da peça acabada.

## 5 - ANÁLISE / DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 - Considerações Iniciais

O programa da peça determina a forma de confeccioná-la. Para o caso, o processo de confecção envolve quatro operações diferentes para uma primeira fixação da peça na máquina. Em uma segunda fixação, são realizadas mais quatro operações semelhantes àsquelas da primeira fixação da peça. As operações são as seguintes (ver sequência de gráficos no capítulo anterior, figuras 28 à 35):

- faceamento em desbaste;
- faceamento em acabamento;
- torneamento longitudinal em desbaste (envolvendo interpolação linear);
- torneamento longitudinal em acabamento (envolvendo interpolações linear e circular

Cada operação de faceamento foi realizada com um único passe de corte. As operações de torneamento longitudinal foram realizadas com uma sequência de passes de corte.

Os dados das ferramentas, a chamada de dados de máquina e pós-processador, a distância de folga para evitar colisões durante a usinagem, a posição e dimensões do dispositivo de fixação da peça da máquina e a descrição geométrica da peça bruta e acabada foram todos processados corretamente, ou seja, de acordo com os arquivos e com o programa da peça, como pode ser constatado comparando-se os resultados emitidos pelo processador tecnológico (ver item 4.4.5-c) com os dados contidos nos arquivos (ver item 4.4.5-g) e as declarações do programa da peça (ver item 4.4.5-a).

### 5.2 - Determinação das profundidades de corte ( $a_p$ )

A profundidade de corte determinada pelo processador tecnológico é sempre a máxima permissível, em função da ferramenta, da máquina e da distribuição dos passes de corte.

A limitação de  $a_p$  em função da ferramenta foi definida pela equação 2, utilizando os dados contidos no arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas. Neste caso o valor máximo foi 4,83 mm.

A limitação em função da máquina-ferramenta se refere a potência e torque disponíveis para uma combinação de velocidade de corte/avanço/profundidade de corte.

A limitação em função da distribuição dos passes de corte foi definido pelas dimensões geométricas da peça, pela profundidade de corte mínima de desbaste (definida no ADATU) e pela sobremedida de material para posterior operação de acabamento.

Para as operações de faceamento em desbaste, a profundidade de corte foi determinada em função das dimensões geométricas da peça, ou seja, pela quantidade total de material a ser removido e com base no máximo valor permissível contido no arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas. A diferença dimensional entre peça bruta e acabada e a reserva de material para a operação de acabamento determinam que  $a_p = 4,00$  mm, como pode ser constatado pelo posicionamento da ferramenta em seu percurso, definido por valores coordenados emitidos pelo processador (item 4.4.5-c). Portanto, pode-se afirmar que a profundidade de corte para faceamento em desbaste foi calculada corretamente. Também foi correta a determinação de  $a_p = 1,00$ , para as operações de faceamento e torneamento longitudinal em acabamento, pois este valor foi definido no programa da peça como sobremedida de material restante das operações de desbaste precedentes.

Para as operações de torneamento longitudinal em desbaste, as profundidades de corte determinadas conferiram com o valor máximo ( $a_p = 4,83$  mm) na maioria dos passes. Excessões ocorreram quando a diferença de diâmetro entre peça bruta e acabada era de 8,00 mm ( $a_p = 4,00$ ), quando o penúltimo passe de corte foi relocado na primeira fixação da peça ( $a_p = 4,76$  mm) e na segunda fixação ( $a_p = 2,43$  mm). Todos os valores de  $a_p$  acima referidos foram corretamente determinados.

As profundidades de corte usadas nas interpolações, foram definidas pela quantidade de material restante dos passes de corte do torneamento longitudinal em desbaste, devido a diferença entre a geometria da peça e a posição do gume principal da ferramenta. Neste caso, os valores de  $a_p$  foram continuamente variáveis no decorrer do corte em interpolação.

A profundidade de corte bem como os precursos e posicionamento das ferramentas foram verificados a partir de pontos coordenados emitidos pelo processador tecnológico. Seus resultados foram corretos, conforme as colocações acima e simulação gráfica mostrada nas figuras 29 a 36, de onde se constata que foi correta a utilização do arquivo de dados

de materiais de ferramentas e ferramentas.

### 5.3 - Determinação dos avanços (f)

No processamento dos avanços para usinagem de desbaste foram utilizadas as equações 3 e 4, juntamente com dados armazenados no ADATU e no arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas, para cada passe de corte. A verificação dos valores de avanço determinados pelo processador tecnológico foi feita calculando-se manualmente tais avanços. Nesta verificação foi utilizado o nomograma da figura 36(8) para determinar, aproximadamente, as constantes da equação 3, uma vez que o processador não emite listagens intermediárias de onde se poderia saber os valores destas constantes. Os demais dados para calcular manualmente os avanços foram as profundidades de corte já determinadas pelo processador, o ângulo de posição do gume principal de corte da ferramenta ( $\chi = 75^\circ$ , do arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas) e o fator de correção do avanço para desbaste ( $RKAPK = 0,5$ , do ADATU).

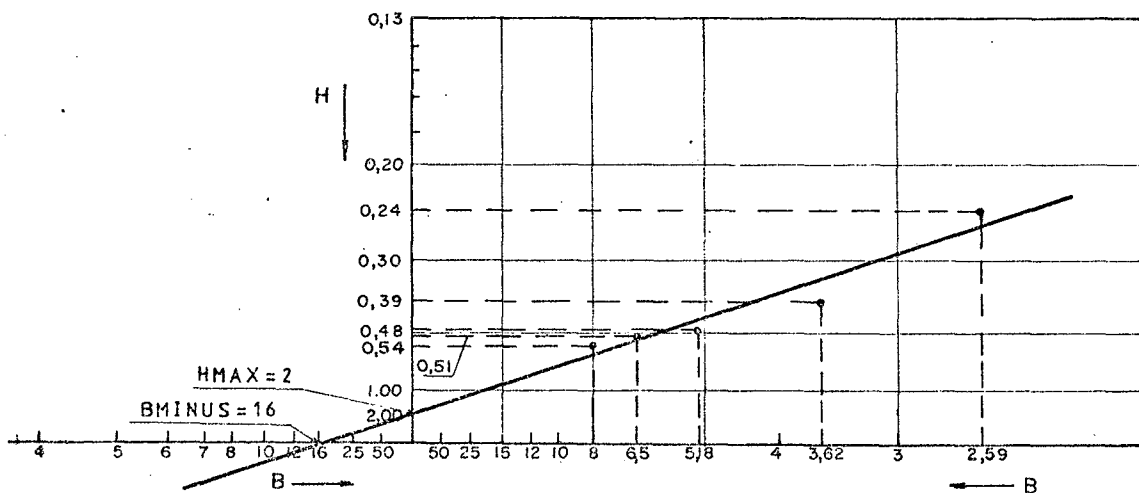


FIG. 36 - Determinação das constantes HMAX e BMINUS.

Para operações de faceamento e torneamento longitudinal, em usinagem de desbaste, os avanços determinados pelo processador, para as diferentes profundidades de corte, ficaram muito próximos dos valores verificados manualmente, como pode ser observado na tabela XI.



Profundidade de corte (mm)	Avanço calculado pelo processador (mm/rot)	Avanço calculado manualmente (mm/rot)
4,83	0,47783	0,47186
4,76	0,47333	0,46659
4,51	0,45847	0,44748
4,00	0,42741	0,41831
2,43	0,23680	0,26831

TABELA XI - Verificação dos valores de avanço em usinagem de desbaste.

As pequenas discrepâncias entre os avanços determinados pelo processador e os calculados manualmente são justificáveis, pois para os últimos foi utilizado um nomograma, portanto com valores aproximados de HMAX e BMINUS, enquanto que para os primeiros foram usados somente cálculos analíticos, portanto, sem aproximações. Porém, isso não impede que se possa comprovar que o processador determinou corretamente os avanços em usinagem de desbaste e, conseqüentemente, que a utilização do ADATU foi correta.

Para operações de torneamento transversal (isto é, interpolações cujas direções do avanço são  $60^\circ$  e  $45^\circ$ , considerando o eixo de rotação da peça) o processador determinou os avanços apresentados na tabela XII:

Profundidade de corte do passe de torneamento longitudinal imediatamente anterior (mm)	Avanço determinado pelo processador (mm/rot)
4,83	0,63498
4,76	0,63498
2,43	0,32912

TABELA XII - Avanços usados no torneamento transversal.

Observa-se, com auxílio da figura 37, que a quantidade de material deixado pelas operações de torneamento longitudinal foram relativamente pequenas (áreas triangulares escurecidas). Portanto, seria impraticável controlar o avanço pela forma do cavaco (equação 3), ou seja

pela relação entre  $b$  e  $h$ . Neste caso, foi utilizada a equação 6, que calcula o avanço em função da qualidade da superfície com regosidade de desbaste ( $R_t = 0,063$  mm), portanto independentemente da profundidade de corte usada no passe de torneamento longitudinal imediatamente anterior. Os avanços determinados pelo processador conferiram com os calculados manualmente, para efeito de verificação. Excessão ocorreu quando a profundidade de corte do passe longitudinal foi sensivelmente menor (em torno da metade) que os valores até então usados. Neste caso, o avanço também foi sensivelmente menor (tabela XII). Isto sugere que o critério de cálculo foi mudado, com forte indicação de que a forma do cavaco voltou a ser considerada, porém não se tem, na literatura disponível, uma fórmula de cálculo que justifique o valor do avanço de  $0,32912$  mm/rot. No entanto, observa-se na tabela XII que foi mantida uma relação  $a_p/f$  em torno de 7,5, de onde pode-se supor que no processador tecnológico esteja estipulada uma faixa de aceitação para a relação  $a_p/f$ , fora da qual o avanço passou a assumir um valor proporcional à profundidade de corte usada.

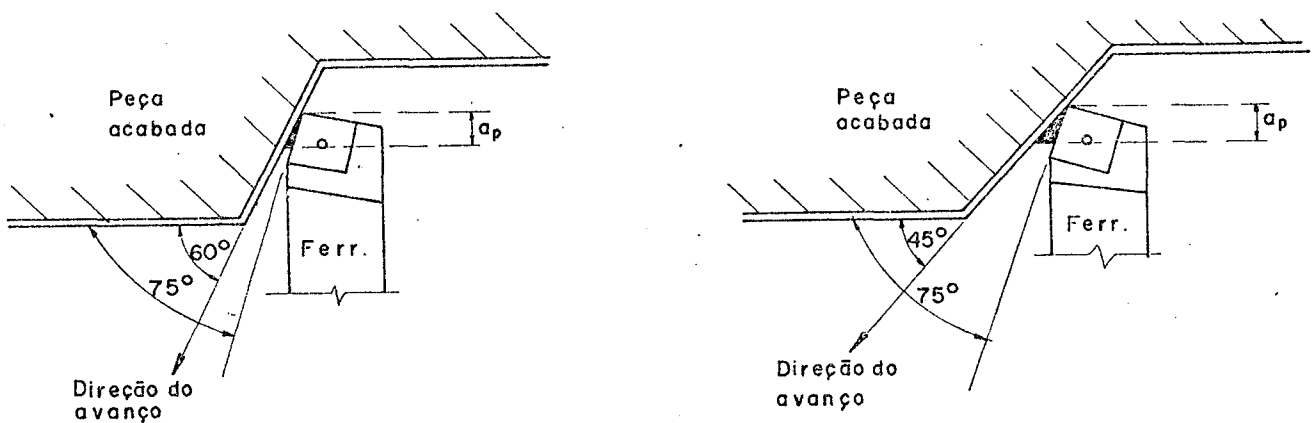


FIG. 37 - Representação da quantidade de material a ser removido em cada passe de torneamento transversal de desbaste, para  $60^\circ$  e  $45^\circ$ .

Para as operações com usinagem de acabamento, o avanço determinado pelo processador tecnológico foi igual a  $0,32$  mm/rot. Para este cálculo foi utilizada a equação 6 com rogosidade de acabamento ( $R_t = 0,016$  mm), sendo esta a forma correta de cálculo como foi verificado utilizando-

se os dados armazenados no ADATU e no arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas, o que novamente confirma a correta utilização destes arquivos pelo processador tecnológico.

#### 5.4 - Determinação das velocidades de corte ( $v_c$ )

O processamento da  $v_c$  foi feita através da equação de Taylor expandida (equação 1), para cada par de valores de  $f$  e  $a_p$  previamente determinados pelo processador tecnológico. Neste processamento foram utilizados dados contidos no ADATU (VSTAND = 529,11; ECONST = -0,1807; FCONST = -0,1440; GCONST = -0,1994; HCONST = 0,2992; VB = 0,3 mm; T = 20 min). Como as rotações da máquina NC são escalonadas, para evitar grandes defasagens da  $v_c$  com a variação do diâmetro usinável (ver equação 16), foi utilizado no programa da peça a declaração CSRAT/80 indicando que  $v_c$  pode variar até 20% do valor calculado pela equação de Taylor. Assim tem-se uma faixa adequada de  $v_c$ .

Na tabela XIII, abaixo, estão relacionadas as  $v_c$  determinadas pelo processador tecnológico e as respectivas faixas adequadas de  $v_c$ , para as diversas operações de usinagem realizadas na confecção da peça.

Para operações de faceamento (tabela XIII), as velocidades de corte (rotações) determinadas pelo processador tecnológico tenderam a permanecer fora das faixas adequadas de  $v_c$ , apresentando valores defasados. Em certos casos esta defasagem foi relativamente grande considerando o limite inferior da respectiva faixa adequada de  $v_c$ .

Para operações de usinagem em tornos com rotações escalonadas, quando a variação contínua do diâmetro usinável é relativamente grande, a troca de rotação pode levar a uma considerável queda no valor de  $v_c$ . Mas, levando em conta a capacidade da máquina, isto pode ser considerado como uma medida de segurança (5).

A faixa adequada de  $v_c$  pode, também, ser determinada por um fator de sobrecarga de torque, contido no arquivo de dados de máquinas-ferramentas.

Presume-se que esteja estipulado, no programa de processamento das condições de usinagem, um valor máximo de variação do diâmetro usinável sem que ocorra troca de rotação, desde que a capacidade da máquina-ferramenta não seja ultrapassada.

OPERAÇÃO	DIÂMETRO USINÁVEL (MM)	ROTAÇÃO (rpm)	$v_c$ DETERMINADA PELO PROCESSO- DDR (M/MIN)	AVANÇO (MM/ROT)	PROFUNDIDADE DE CORTE (MM)	FAIXA DE $v_c$ CALCULADA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE TAYLOR(M/MIN)
FACEAMENTO DE DESBASTE (1ª FIXAÇÃO)	60 - 70,8	710	134 - 158	0,42741	4,00	155 - 233
	70,8 - 140	355	79 - 156	0,42741	4,00	155 - 233
FACEAMENTO DE ACABAMENTO (1ª FIXAÇÃO)	60 - 70,8	1000	188 - 222	0,32	1,00	200 - 299
	70,8 - 140	500	111 - 220	0,32	1,00	200 - 299
TORNEAMENTO LONGITUDINAL DE DESBASTE (1ª FIXAÇÃO)	140	355	156	0,47783	4,83	148 - 222
	140	355	156	0,42741	4,00	133 - 200
	130,3	355	145	0,47783	4,83	148 - 222
	120,7	500	190	0,47783	4,83	148 - 222
	111	500	174	0,47333	4,76	149 - 223
	101,5	500	159	0,47333	4,76	149 - 223
TORNEAMENTO LONGITUDINAL DE ACABAMENTO INCLUINDO INTERPOLAÇÃO LINEAR (1ª FIXAÇÃO)	140	500	220	0,32	1,00	200 - 299
	92	710	205	0,32	1,00	200 - 299
	92 - 132	500	145 - 207	0,32	3,60 (APROX)	165 - 247
	132	500	207	0,32	1,00	200 - 299
FACEAMENTO DE DESBASTE (2ª FIXAÇÃO)	60 - 70,8	710	134 - 158	0,42741	4,00	133 - 200
	70,8 - 140	355	79 - 156	0,42741	4,00	133 - 200
FACEAMENTO DE ACABAMENTO (2ª FIXAÇÃO)	60 - 70,8	1000	188 - 222	0,32	1,00	200 - 299
	70,8 - 140	500	111 - 220	0,32	1,00	200 - 299
TORNEAMENTO LONGITUDINAL DE DESBASTE (2ª FIXAÇÃO)	140	355	156	0,47783	4,83	148 - 222
	130,3	355	145	0,47783	4,83	148 - 222
	120,7	500	190	0,47783	4,83	148 - 222
	111	500	174	0,47783	4,83	148 - 222
	111	500	174	0,45847	4,51	151 - 226
	101,4	500	159	0,47783	4,83	148 - 222
	91,7	710	204	0,23680	2,43	185 - 278
	86,9	710	194	0,23680	2,43	185 - 278
TORNEAMENTO LONGITUDINAL DE ACABAMENTO INCLUINDO INTERPOLAÇÃO LINEAR E A ÚLTIMA INTERPOLAÇÃO CIRCULAR	82	710	183	0,32	1,00	200 - 299
	82 - 102	710	183 - 227	0,32	2,00 (APROX)	181 - 271
	102	500	160	0,32	1,00	200 - 299
	102 - 110	500	160 - 173	0,32	3,76 (APROX)	165 - 247
	100 - 130	500	173 - 204	0,32	1,00 (APROX)	200 - 299

TABELA XIII - Condições de usinagem usadas nas diferentes operações para confecção da peça.

Nas operações de torneamento longitudinal em desbaste, as velocidades de corte,  $v_c$ , determinadas pelo processador tecnológico, permaneceram dentro das faixas estipuladas pela equação de Taylor e pelo programa da peça. Observa-se ainda que a troca de rotação foi feita quando a  $v_c$  se aproximava dos limites da referida faixa de  $v_c$ , pois o próximo diâmetro usinável significaria um valor de  $v_c$  inadequado, caso não houvesse troca de rotação. Isto indica a correta determinação da  $v_c$ . O mesmo ocorreu para as operações de torneamento longitudinal em acabamento. Nota-se porém que quando eram envolvidas interpolações, onde a redução do diâmetro era contínua e relativamente acentuada, a  $v_c$  ficou fora da faixa adequada, para pequenos trechos de corte. Este fato pode ser justificado pelas mesmas colocações feitas para operações de faceamento.

Observa-se que os valores de  $v_c$ , determinados pelo processador, estão dentro da faixa de velocidades utilizadas no ensaio de usinabilidade que definiu a constante e expoentes da equação de Taylor. Excesso ocorreu quando houve limitações na utilização (troca) de rotações.

Das colocações feitas acima, referentes à  $v_c$ , conclui-se que sua determinação pelo processador tecnológico foi correta e, consequentemente, a utilização e construção do ADATU só pode estar correta também.

## 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

### 6.1 - Conclusões

A simples implantação de um sistema do tipo EXAPT 2, detentor de uma tecnologia estrangeira que está em constante evolução e aperfeiçoamento, por mais que se queira ressaltar a sua eficiência, não é garantia automática de maior produtividade e melhor qualidade no produto usinado. É portanto de fundamental importância que, entre outras coisas, seja mantida uma documentação detalhada e atualizada do referido sistema, cujo uso deve ser permanente, caso contrário estará sujeito a uma regressão tecnológica de tal ordem que o colocará sob risco de ser, em pouco tempo, totalmente suplantado.

A utilização do ADATU é considerada de aplicação universal, podendo ser estendida a outros sistemas de programação NC de alto nível (além do sistema EXAPT 2, ao qual está vinculado) através de adaptações adequadamente realizadas em seus respectivos processadores, desde que estes, evidentemente, sejam abertos a quem se proponha a realizar tal tarefa.

A metodologia de ensaio de usinagem apresentada no trabalho pode servir de apoio à aquisição de dados para o ADATU (e então para o banco de dados) através de diferentes instituições capacitadas para tal. Isto representa o início de um intercâmbio de informações de usinagem não só a nível nacional, sob gerenciamento do CINFUS, mas cuja utilização poderá ultrapassar as fronteiras para chegar a outros países que já mantêm algum tipo de intercâmbio, científico e tecnológico (formal ou informal) com o Brasil, como é o caso da Argentina e Colômbia.

Os dados inseridos no ADATU, quando gerenciados por um banco de dados, também poderão servir à usinagem convencional, no sentido de facilitar a determinação de condições de corte corretas e representativas para materiais, ferramentas e máquinas em uso no país, o que poderá representar um apoio significativo à indústria nacional.

A utilização otimizada do ADATU pode ficar prejudicada se houver limitações tecnológicas impostas pela máquina e/ou ferramenta. Is-

to ficou evidenciado por valores de  $v_c$  muito fora da faixa ideal de utilização, devido a limitações de potência e pelo fato da máquina não possuir variador contínuo de rotações.

As condições de usinagem obtidas pelo processador tecnológico ficaram dentro das faixas de valores usadas no ensaio para geração de dados do ADATU (exceto quando ocorreram limitações tecnológicas, como foi citado no parágrafo anterior). Isto garante que a determinação automática das condições de usinagem se processou corretamente.

As equações de Taylor simples e expandida, aplicadas as mesmas condições de usinagem, apresentam resultados diferentes.

Com base nestes resultados e considerando que a equação de Taylor simples não leva em conta as variações de  $f$ ,  $a_p$  e  $VB$ , conclui-se que bancos de dados de usinagem serão mais representativos e abrangentes, se seus dados forem gerados com uso da equação de Taylor expandida (conforme equação 20, no caso específico deste trabalho).

## 6.2 - Sugestões para trabalhos posteriores

Levantamento dos materiais mais utilizados em processos de usinagem, na indústria nacional.

Elaboração e implantação de rotinas em outros processadores de sistemas de programação (APT, INTERAPT, etc) disponíveis no Brasil, para que possam ter acesso ao ADATU.

Implantação do sistema em algumas indústrias, dentro de um projeto piloto, para que possa ser testado sob condições reais de trabalho, buscando com isso o levantamento de falhas que possam levar a um aperfeiçoamento do sistema como um todo.

Criação de arquivos de dados de materiais de ferramentas e ferramentas e de dados de máquinas-ferramentas visando completar a gama de elementos necessários para chegar a um nível de automatização mais completo da tecnologia de usinagem.

## BIBLIOGRAFIA

- ( 1 ) STEMMER, C.E., "Novos Rumos e Perspectivas na Automatização da Indústria Mecânica", Revista Máquinas & Ferramentas, Março 1982 p.118-128, Maio 1982 p. 88-101, Junho 1982 p. 64-85.
- ( 2 ) BOEHS, L., STEMMER, C.E., "INFUS - Banco de Informações de Usinagem, Publicação interna do GRUCON-UFSC, 1984.
- ( 3 ) N.N., "N/C Machinability Data Systems", SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS, Noel R. Parsons Editor, Dearborn, 1971.
- ( 4 ) N.N., "EXAPT 2 Manual", EXAPT-VEREIN, Aachen, 1974.
- ( 5 ) N.N., "Machine Tool File for Turning Operations", EXAPT-VEREIN, Aachen, 1981.
- ( 6 ) N.N., "Programing of Turning and Centric-Drilling Operations with Automatic Planning of Technology", EXAPT-VEREIN, Aachen, 1979.
- ( 7 ) N.N., "Tool Card File for Lathe Tools", EXAPT-VEREIN, Aachen, 1972.
- ( 8 ) N.N., "Registration of Reference Values for Preparation of Material File for Turning", EXAPT-VEREIN, Aachen, 1976.
- ( 9 ) N.N., "Material File for Turning Operations", EXAPT-VEREIN, Aachen, 1981.
- (10) BOEHS, L., "Influência do Sulfeto de Manganês na Usinabilidade do Ferro Fundido Maleável Preto Ferrítico", Dissertação de Mestrado, UFSC, 1979.
- (11) FERRARESI, D., "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Volume 1, Editora Edgard Blüches Ltda, São Paulo, 1977.
- (12) FIELD, M., "Relation of Microestructure to the Machinability of Wrought Steel and Cast Iron", Metcut Research Associates Inc., Cincinnati.



- (13) HIRSCH, B., "Ein System zur Ermittlung von Zerspanungsvorgabewerten, insbesondere bei rechnergestützter Programmierung von NC-Drehmaschinen".Diss.TH Aachen, 1969.
- (14) Programa "AUSWER", Núcleo de Processamento de Dados, UFSC, 1982.
- (15) N.N., "Sumary of Determination of Cutting Values for Turning Operations" EXAPT-VEREIN, Aachen, 1976.
- (16) N.N., "DAFES - Manual Version S1/2",EXAPT-VEREIN, Aachen, 1979.
- (17) Programa "KURVE", Núcleo de Processamento de Dados, UFSC, 1982.
- (18) N.N., "Standard Material File", EXAPT-VEREIN, Aachen, 1970.
- (19) N.N., "Specification for Tool-Life Testing with Single Point Turning Tools", ISO 3685, British Standards Institution, Gr.8, 1977.
- (20) KONIG, W., "Fertigungsverfahren" , Band 1, VDI Verlag, Dusseldorf , 1981.
- (21) PFAU,D., WERNER, G., WINKLER, H.H., "Informationszentrum für Schnittwert", Industrie-Anzeiger Nr. 105, Ausgabe Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Aachen, Dezember, 1971.
- (22) FIELD, M., KAHLE, J.F., "Definition de L'usinabilité", B.D.T. nº 30 , Usinabilité des Fontes, Octobre, 1963.
- (23) N.N., "Zerspankraftmessung im Drehversuch", STAHL EISEN PRUFBLATT / 1168-69, Dezember, 1969.
- (24) N.N., "Speeds and Feeds for Better Turning",MONARCH MACHINE TOOL COMPANY, Manual 3643 (5M) D79, 5ª Edição.
- (25) MESQUITA, N.G.M., "Determinação dos Parâmetros da Fórmula Expandida de Taylor", Dissertação de Mestrado, UFSC, 1980.
- (26) PIESKE,A., CHAVES FILHO, L.M., REIMER,J.F., "Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade", 3ª Edição, SOCIEDADE EDUCACIONAL TUPY, Joinville, 1980.

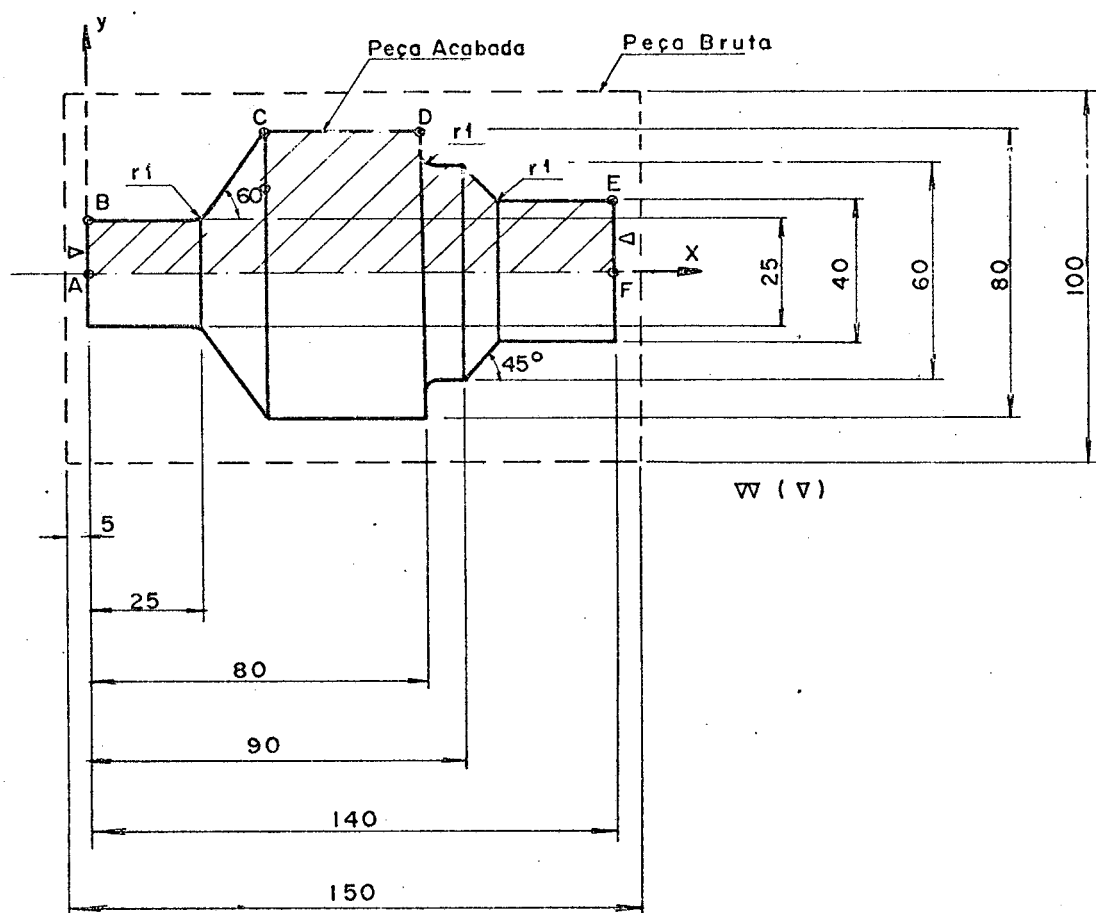
- (27) N.N., "A Escolha da Ferramenta para Torneamento e dos Dados de Usina - gem", SANDVIK-COROMANT, Catálogo Pt-8040 B-2, São Paulo.
- (28) N.N., "Insertos de Metal Duro", BRASSINTER S.A., Catálogo MDI-3/79, São Paulo.
- (29) CARDEN, R.L., LAMB, A.D., "Problems Arising During the Machining of Cast Iron", The British Cast Iron Research Association.
- (30) BOWKER, A.H., LIEBERMAN, G.J., "Engineering Statistics", Prentice Hall, Inc., 2ª edição, Englewood - Cliffs, 1972, p. 454-458.
- (31) SPIEGEL, M.R., "Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas", Editora Mc Graw-Hill do Brasil, Coleção Schaum, 1973.

## APÊNDICE I

# EXEMPLO TÍPICO DE PROGRAMA PARA CONFECÇÃO DE UMA PEÇA, EM EXAPT 2

Como as peças usinadas por torneamento em geral são axialmente simétricas ou com pouca assimetria, a descrição do contorno pode ser feita utilizando-se o desenho da metade da peça, em um sistema de duas coordenadas resultando em contorno fechado.

A figura abaixo mostra o desenho de uma peça no sistema de coordenadas x-y. O programa EXAPT 2 abaixo, correspondente a tal peça, representa um exemplo típico (3).



Desenho da peça exemplo.

## PROGRAMA EXEMPLO

```

01 PARTNO / PECA EXEMPLO
02 MACHIN / TURNO1
03 PART / MATERL,2200
04 CLPRNT
.....
05 CONTUR / BLANCO
06 BEGIN / -5,0,YLARGE,PLAN,-5
07 RGT / DIA,100
08 RGT / PLAN,145
09 RGT / DIA,0
10 TERMC0
.....
11 SURFIN / FIN
12 CONTUR / PARTCO
13 A,BEGIN / 0,0,YLARGE,PLAN,0,ROUGH
14 B,RGT / DIA,25,ROUND,1
15 LFT / ILINE / (POINT / 25,12.5),ATANGL,60)
16 C,RGT / DIA,80
17 D,RGT / PLAN,90,ROUND,1
18 LFT / DIA,60
19 RGT / (LINE/(POINT/90,20),ATANGL,-45),ROUND,1
20 LFT / DIA,40
21 E,RGT / PLAN,140,ROUGH
22 F,RGT / DIA,0
23 TERMC0
.....
24 CLDYST / 2
25 QVSIZE / FIN,0.8
26 CSRAT / 60
27 COOLNT / UN
.....
28 FACEAR=TURN/TOOL,101,1,SETANG,180,CROSS,ROUGH
29 CILIND=TURN/TOOL,111,2,SETANG,-90,LONG,ROUGH
30 ACABAM=CONT/TOOL,111,2,SETANG,-90,FIN
.....
31 CHUCK / 50,0,250,25,25,-50
32 CLAMP / -5
.....
33 CUTLTC / BEHIND
34 WORK / FACEAR
35 CUT / E,TO,F
36 WORK / CILIND,ACABAM
37 CUT / E,RE,C
38 CLAMP / 80,INVERS
39 WORK / FACEAR
40 CUT / B,RE,A
41 WORK / CILIND,ACABAM
42 CUT / B,TO,D
43 WORK / NMORE
.....
44 FINI
.....

```

DADOS GERAIS

DESCRICAO DO  
CONTORNO DA  
PECA BRUTA

DESCRICAO DO  
CONTORNO DA  
PECA ACABADA

DADOS ADICIONAIS

DEFINICOES  
TECNOLOGICAS

INSTRUCCOES DE  
FIXACAO

INSTRUCCOES PARA  
EXECUCAO DE  
CORTES

FIM DE PROGRAMA

Cada linha do programa da peça representa uma declaração que especifica uma informação para a confecção da peça. Para o exemplo citado, tem-se:

- linha 1: Início de programa com texto de identificação do programa.
- linha 2: Seleção e ativação do pós-processador no arquivo de dados de máquinas-ferramentas.
- linha 3: Seleção e chamada de dados do material (nº 2300) no arquivo de dados tecnológicos de usinagem.
- linha 4: Ativação da impressora para os resultados do processamento (CLTAPE).
- linha 5: Início da descrição de contorno da peça bruta.
- linhas 06 a 09: Descrição de contorno da peça bruta.
- linhas 10 e 23: Fim de descrição de contorno.
- linha 11: Definição da qualidade da superfície dos elementos de contorno da peça acabada que não tenham indicação desta qualidade. A superfície da peça terá qualidade de acabamento (FIN) exceto para os elementos de contorno definidos nas linhas 13 e 21, onde está indicado qualidade de desbaste (ROUGH).
- linha 12: Início da descrição de contorno da peça acabada.
- linhas 13 a 22: Descrição de contorno da peça acabada.
- linha 24: Distância de folga (2 mm) para proteção da peça, ferramenta e fixação.
- linha 25: Sobremedida de acabamento (0,8 mm de material deve sobrar da operação que antecede o passe de acabamento).
- linha 26: Pré-especificação de um campo de velocidades de corte representando a porcentagem mínima (60%) permissível da velocidade de corte calculada, determinada pela razão entre o limite inferior da velocidade de corte e seu valor máximo permissível.
- linha 27: Ativação de fluido de corte.
- linhas 28 a 30: Definição do processo de trabalho:
  - .A linha 28 descreve uma operação de faceamento, seleciona a ferramenta (nº 101) no arquivo de dados de materiais de ferramentas e ferramentas, define a posição da ferramenta no magazine da máquina, especifica o ângulo de posição do gume principal da ferramenta, define o tipo de usinagem (desbaste).
  - .A linha 29 especifica uma operação de torneamento longitudinal, com os mesmos tipos de definições contidos

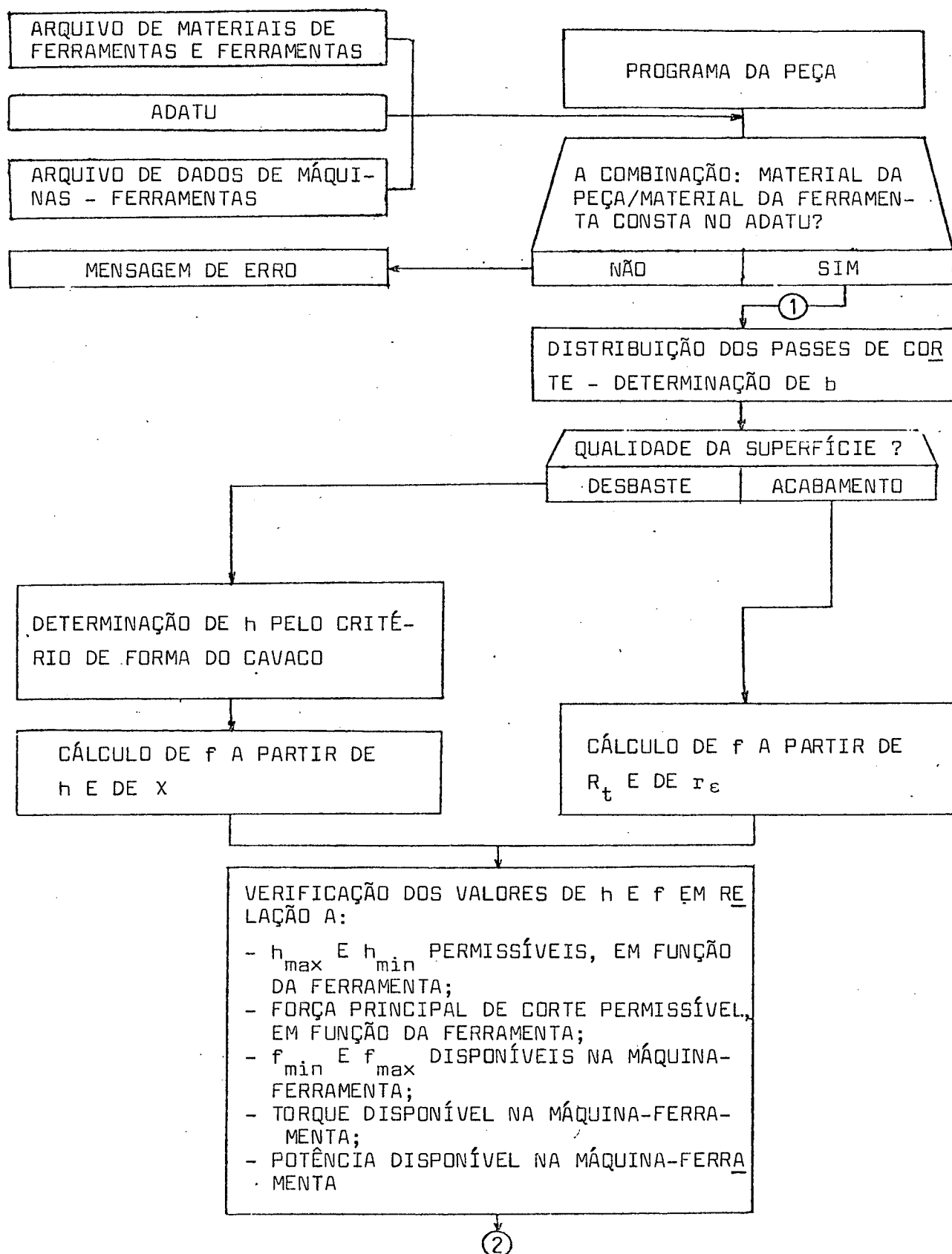
na linha 28.

.A linha 30 especifica uma operação de acabamento posterior a operação especificada na linha 29.

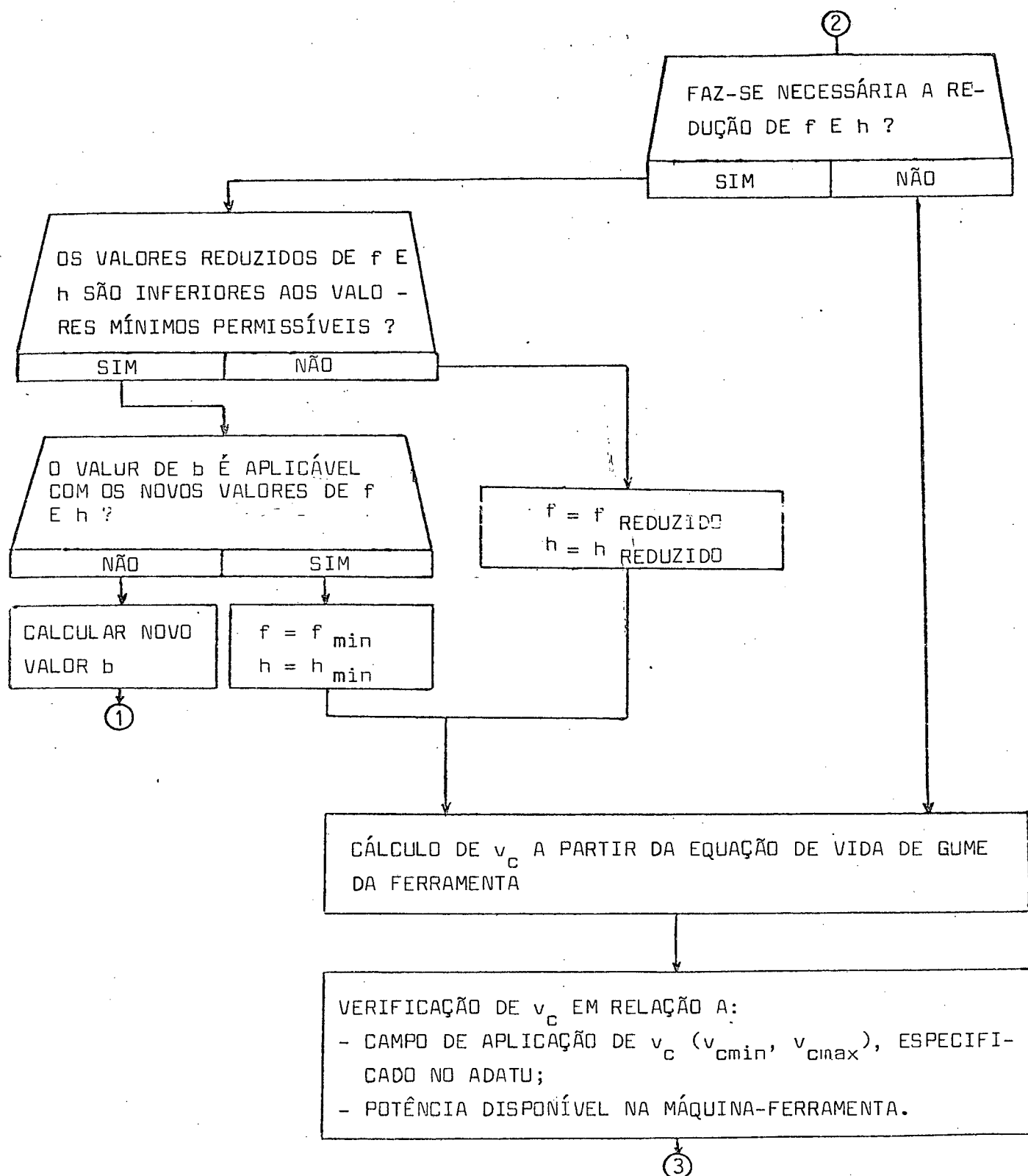
- linha 31: Define a posição de fixação da peça no sistema de coordenadas da máquina-ferramenta.
- linha 32: Define a posição de fixação da peça no sistema de fixação na máquina-ferramenta.
- linha 33: Especificação da posição de usinagem em relação ao eixo de rotação da árvore da máquina-ferramenta.
- linhas 34 a 42: Delimitação da região a ser usinada para cada operação especificada.
- linha 38: Indica a fixação inversa da peça com a nova posição no sistema de fixação da máquina.
- linha 43: Indicação de fim dos processos de trabalho para execução dos cortes.
- linha 44: Fim de programa.

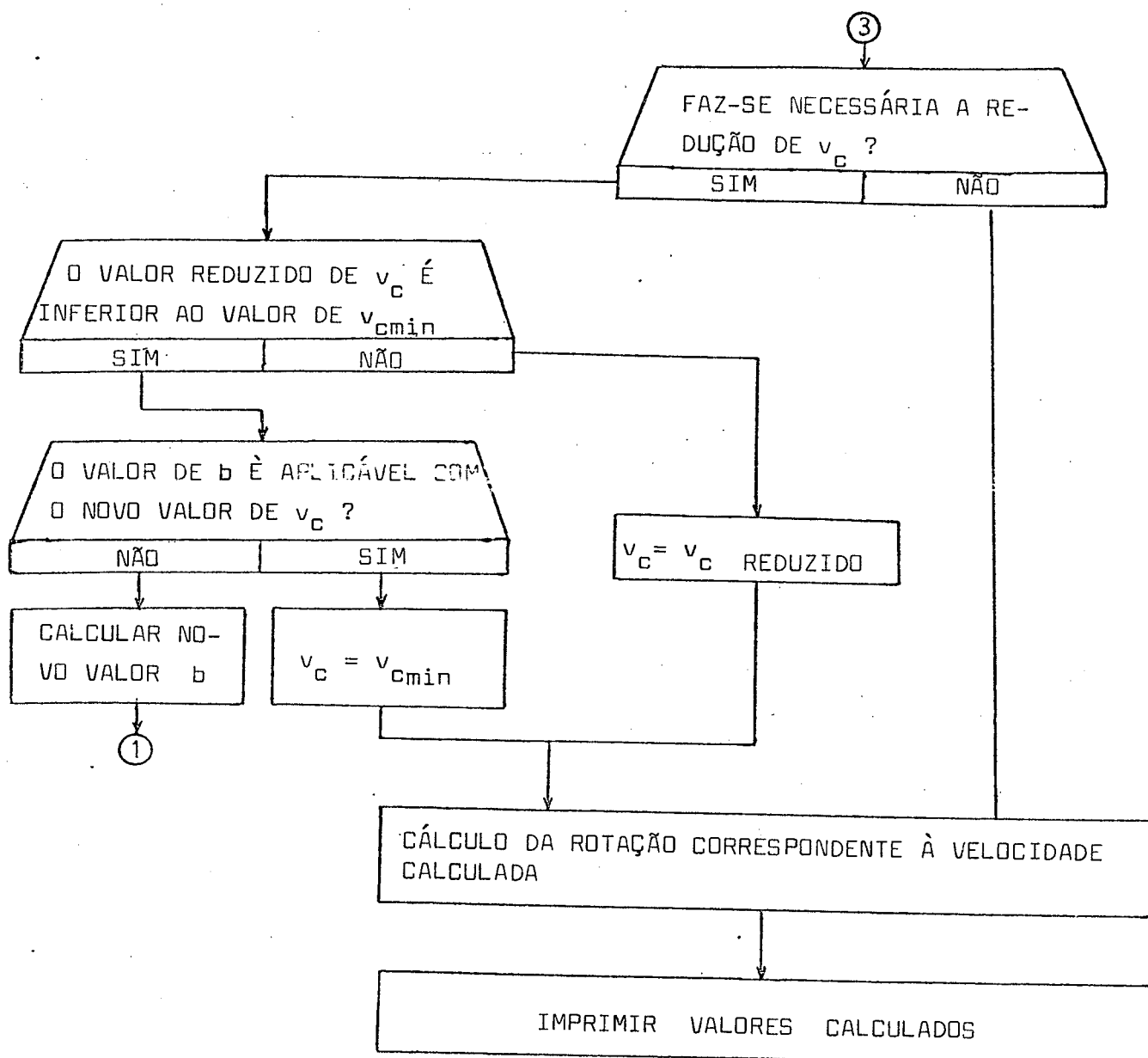
## DIAGRAMA DE BLOCOS

Determinação automática das condições de usinagem









## APÊNDICE II

## CÁLCULO ESTIMATIVO DA QUANTIDADE DE CORPOS-DE-PROVA PARA O PRÉ-ENSAIO

Para cada combinação de condições de usinagem, calculou-se inicialmente o tempo de usinagem de cada passe da ferramenta ao longo do comprimento usinável do corpo de prova, seguindo-se o procedimento abaixo:

1º) Cálculo do número de rotações por minuto,  $n$ :

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d}$$

2º) Conversão do valor do avanço dado em mm/rot,  $f$ , para o valor correspondente em mm/min,  $f'$ :

$$f' = n \cdot f$$

3º) Cálculo do tempo de cada passe,  $t$ , em minutos, para um comprimento médio usinável,  $c$  (no caso, igual a 450 mm):

$$t = \frac{c}{f'}$$

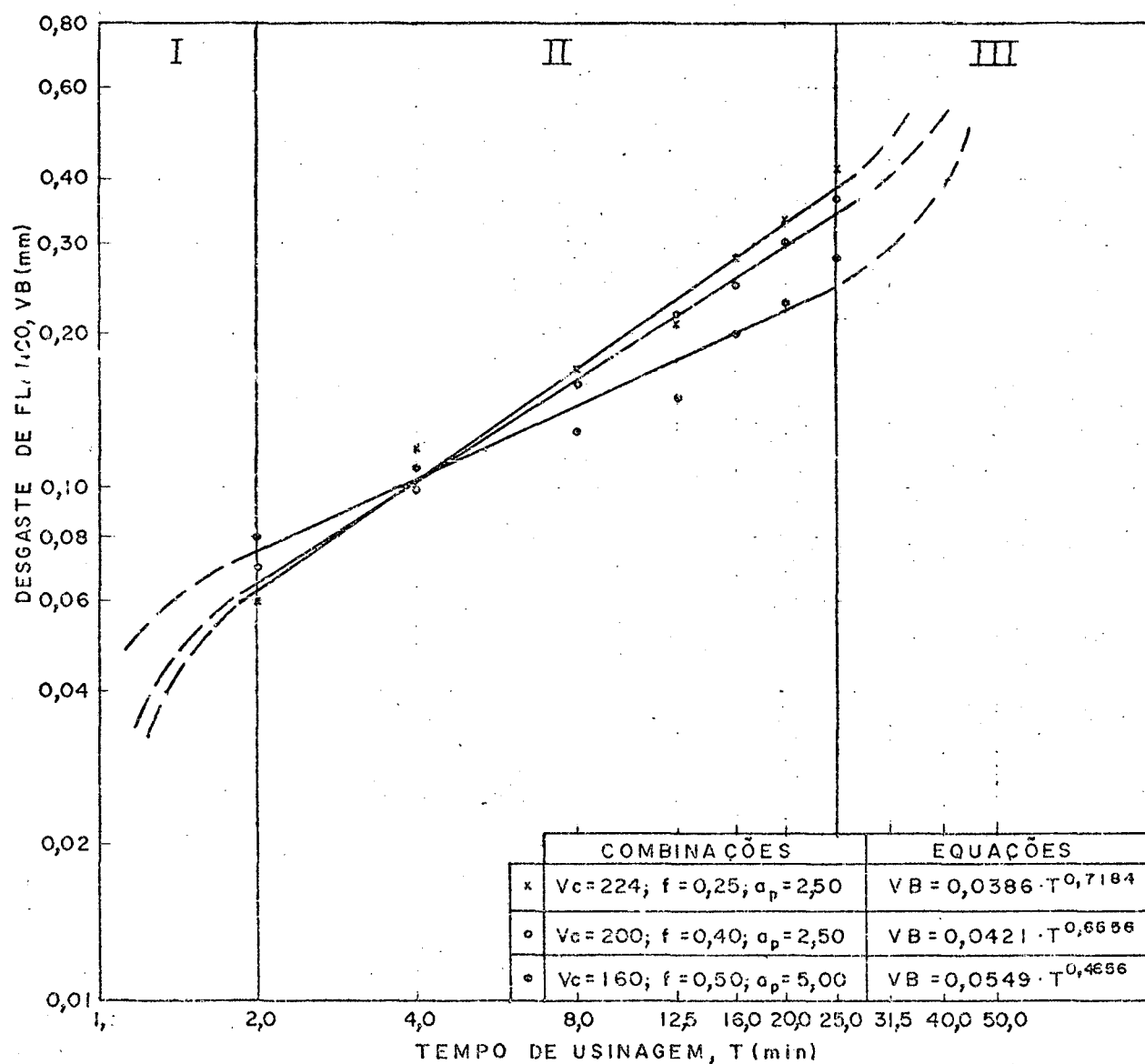
Com base na profundidade de corte da combinação de condições de usinagem utilizada, determinou-se a redução no diâmetro do corpo-de-prova para que fosse atingido um tempo de usinagem acumulado igual a 25 minutos\*. De acordo com as dimensões do corpo-de-prova, quando o diâmetro atingia o valor estipulado em 130 mm, fazia-se necessário novo corpo-de-prova.

Os cálculos indicaram a necessidade de, no mínimo, 3 (três) corpos-de-prova para realização do pré-ensaio.

---

\* - Tempo máximo de usinagem pré-determinado (item 3.9), para cada combinação de condições de usinagem escolhida para o pré-ensaio.

## COMPORTAMENTO DO DESGASTE DA PASTILHA NO PRÉ-ENSAIO



Curvas de desgaste da pastilha X tempo de usinagem no pré-ensaio.

## CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL USADO NO PRÉ-ENSAIO

### 1º) Ensaio de dureza

Para medição de dureza foi utilizado o método Brinell com esfera de diâmetro 2,5mm e com carga de 1839 N (187,5 kgf), aplicada durante 30 segundos.

As regiões de medições de dureza estão de acordo com aquelas mostradas na figura 17 (item 4.3). Os pontos de aplicação de carga foram distribuídos nestas regiões, de forma a abranger toda espessura da parede dos corpos-de-prova.

A tabela abaixo apresenta os resultados das medições de dureza.

Corpo-de-Prova	Dureza Brinell	Desvio Padrão
1	90,84	7,31
2	92,88	7,13
3	85,90	5,47
MÉDIA: 89,87		D.PADRÃO: 3,59

Dureza Brinell (HB) do material usado no pré-ensaio  
(valores médios)

### 2º) Ensaio de tração

Os corpos-de-prova para ensaio de tração foram extraídos de regiões intermediárias às posições de medições de dureza (figura 17), com forma e dimensões mostradas na figura 21. De cada corpo-de-prova para ensaio de vida de gume da ferramenta foi extraído um corpo-de-prova para ensaio de tração.

No ensaio, era medido o limite resistência à tração do material. Os resultados estão mostrados na tabela a seguir.

Corpo-de-Prova	Limite de Resistência (N/mm <sup>2</sup> )
1	74,16
2	73,38
3	76,52
MÉDIA: 74,69	DESVIO PADRÃO: 1,63

Limite de resistência à tração do material usado no pré-ensaio.

### 3º) Análise metalográfica

As amostras para análise metalográfica foram extraídas de posições adjacentes às regiões de medições de dureza (figura 17). Foi usada uma amostra por corpo-de prova sendo esta subdividida em três porções da parede, a saber: porções externa, média e interna.

A análise metalográfica mostrou que o material apresentava grafitas da forma I e tipo A (classificação ASTM\*) sobre um fundo predominantemente ferrítico com regiões perlítico-ferríticas. Apenas em algumas regiões da periferia predominaram lamelas de grafita relativamente pequenas (números 3 e 4 - ASTM) embora bastante concentradas. De resto, as lamelas apresentaram-se em tamanhos bastante grandes (números 1 e 2 - ASTM), apresentando entre elas lamelas excessivamente grandes.

---

\* - ASTM - American Society for Testing Materials.

# CÁLCULO DO NÚMERO MÍNIMO DE MEDIÇÕES DE DESGASTE PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE VIDA DE GUME - TESTE DE KOLMOGOROV/SMIRNOV (25, 30)

Segundo Mesquita (25), para que os resultados dos experimentos tenham um grau de confiabilidade aceitável deve-se medir o desgaste da pastilha um determinado número de vezes durante sua evolução. Para saber o número mínimo de medições é necessário conhecer o tipo de distribuição dos desgastes para que se possa aplicar a expressão de cálculo adequada. Neste sentido, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov utilizando-se os resultados das medições de desgaste obtidas no pré-ensaio de vida de gume.

Dividiu-se as medições de desgaste em classes de amplitudes iguais utilizando-se a equação abaixo:

$$m = 1 + 3,3 \log p$$

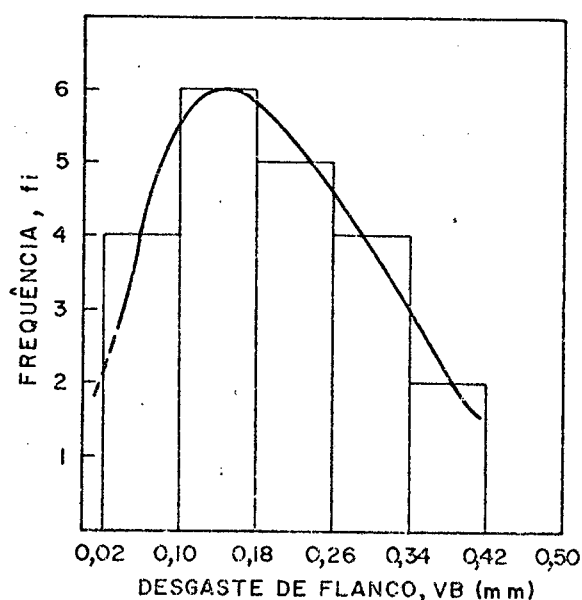
onde:

m = número de classes de mesma amplitude

p = número de medições de desgaste

Como p é igual a 21 (ver Apêndice IV), tem-se 5 classes de mesma amplitude.

A frequência  $f_i$  com que os desgastes VB aparecem dentro de cada classe é mostrada na figura abaixo.



Frequência dos valores de desgaste.



Aparentemente, os valores de desgaste apresentam uma distribuição normal. Supondo que assim seja, a estatística de Kolmogorov-Smirnov,  $D_n$ , pode ser calculada pela seguinte equação:

$$D_n = \max [ F_n (VB) - F_o (VB) ]$$

onde:

$F_n (VB) = \frac{f_i}{p}$  é a função distribuição acumulada com  $f_i = 0,1,2,\dots, p$ , sendo  $p$  o número total de medições de desgaste.

$F_o (VB) = \Phi \left( \frac{VB - \overline{VB}}{\sigma} \right)$  é a função de distribuição acumulada da normal reduzida; valores tabelados (31).

com:

$VB$  = Desgaste de flanco

$\overline{VB}$  = Média dos desgastes de flanco

$\sigma$  = Desvio padrão dos desgastes de flanco

O valor médio e o desvio padrão das medidas de desgaste foram os seguintes:  $\overline{VB} = 0,20$  mm

$\sigma = 0,10$  mm

Na tabela abaixo estão os valores calculados para o teste de Kolmogorov-Smirnov, de onde obteve-se o valor de  $D_n = 0,0555$ .

Classes	$f_i$	$F_n (VB)$	$F_o (VB)$	$ F_n (VB) - F_o (VB) $
$0,02 \leq VB \leq 0,10$	4	0,1905	0,1587	0,0318
$0,11 \leq VB \leq 0,18$	6	0,4762	0,4207	0,0555
$0,19 \leq VB \leq 0,26$	5	0,7143	0,7258	0,0115
$0,27 \leq VB \leq 0,34$	4	0,9048	0,9192	0,0144
$0,35 \leq VB \leq 0,42$	2	1,0000	0,9861	0,0139

#### Teste de Kolmogorov - Smirnov

Para um nível de significância  $\alpha = 5\%$  e uma população  $p = 21$  elementos, obteve-se pela equação abaixo (30), o valor tabelado da estatística de Kolmogorov-Smirnov  $d_{\alpha,n}$ .

$$d_{s,n} = \frac{1,36}{\sqrt{p}} = 0,2968$$

Como o valor calculado da estatística de Kolmogorov-Smirnov foi menor que o valor tabelado ( $D_n < d_{s,n}$ ), o teste indicou que as medidas têm uma distribuição normal. Neste caso, a equação para determinar o número mínimo de medições de desgaste para o ensaio de vida de gume é a seguinte:

$$N = \left( \frac{Z_s \cdot \sigma}{\delta} \right)^2$$

onde:

$N$  = Número mínimo de medições de desgaste;

$Z_s$  = Valor extraído da curva normal para 95% de probabilidade dos resultados estarem certos ( $Z_s = 1,96$ );

$\sigma$  = desvio padrão das medidas de desgaste

$\delta$  = erro percentual máximo admissível, tomado igual a 5%.

Portanto, pela equação anterior:

$$N = \left( \frac{1,96 \cdot 0,10}{0,05} \right)^2 = 15,37$$

Então, o número mínimo de medições de desgaste para realização do ensaio de vida de gume é 16 (dezesesseis).

## CÁLCULO ESTIMATIVO DA QUANTIDADE DE CORPOS-DE-PROVA PARA O ENSAIO DE VIDA DE GUME

O procedimento de cálculo foi o mesmo utilizado para determinar a quantidade de corpos-de-prova para pré-ensaio, porém aqui o limite de tempo de usinagem para as diferentes combinações foi definido pelo comportamento do desgaste da pastilha no pré-ensaio (ver gráfico desgaste X tempo, neste Apêndice), ou seja, verificou-se o tempo de usinagem necessário para que o critério de fim de vida de gume ( $VB = 0,40$  mm) fosse alcançado, em cada combinação usada no pré-ensaio. Considerou-se que as combinações 2, 3, 4 e 5 (tabela V) apresentariam comportamentos de desgaste semelhantes entre si, assim como as combinações 6, 7, 8, 9 e 10 teriam outros comportamentos de desgaste também semelhantes entre si\*. Assim sendo, os resultados do pré-ensaio indicaram que para o primeiro conjunto de combinações, o critério de fim de vida será alcançado com um tempo de usinagem aproximado de 30 minutos. A mesma análise sugeriu que para o segundo conjunto, o tempo será de aproximadamente 70 minutos. Para a combinação 1 espera-se que o critério de fim de vida seja atingido em um tempo de usinagem inferior a 25 minutos, assim como para a combinação 11 o tempo esperado é superior a 50 minutos de usinagem.

Pelo estudo acima e seguindo as recomendações contidas no item 3.9 deste trabalho, os tempos de usinagem ficaram estipulados em:

- 25 minutos para combinação 1
- 31,5 minutos para as combinações 2, 3, 4 e 5
- 50 minutos para as combinações 6, 7, 8, 9, 10 e 11

Nestas condições, os cálculos indicaram a necessidade de 10 (dez) corpos-de-prova para realização do ensaio de vida de gume.

---

\* - As considerações feitas no texto foram baseadas no fato de que a velocidade de corte é o fator de maior influência no comportamento de desgaste da pastilha de corte.

## APÊNDICE III

## PROGRAMA DA PEÇA

```

1  PARTNO /      PECA TESTE P/ USO DOS ARQUIVOS DO EXAPT2
2  $$
3  $$
4  MACHIN / CSEPEL
5  CLPRNT
6  $$
7  $$ --- DESCRICAO DA PECA BRUTA ---
8  $$
9  CONTUR / BLANCO
10 BEGIN / -5,30,YLARGE,PLAN,-5
11 RGT / DIA,140 PLAN,145 DIA,60
14 TERMCO
15 $$
16 $$ --- DESCRICAO DA PECA ACABADA ---
17 $$
18 SURFIN / FIN
19 CONTUR / PARTCO
20 A,BEGIN / 0,30,YLARGE,PLAN,0
21 B,RGT / DIA,90
22 LFT / (LINE / (POINT / 25,45),ATANGL,60)
23 C,RGT / DIA,130
24 D,RGT / PLAN,70,ROUND,5
25 LFT / DIA,100
26 RGT / (LINE / (POINT / 90,50),ATANGL,-45)
27 LFT / DIA,80
28 E,RGT / PLAN,140
29 F,RGT / DIA,60
30 TERMCO
31 $$
32 $$ --- DADOS ADICIONAIS ---
33 $$
34 PART / MATERL,2201
35 CLDIST / 2
36 DVSIZE / FIN,1
37 CSRAT / 80
38 CHUCK / 1,583.7,220,30.0,50,-25.6
39 $$
40 $$ --- DEFINICOES TECNOLOGICAS ---
41 $$
42 U=TURN / TOOL,122,1,SETANG,180,CROSS,ROUGH
43 P=TURN / TOOL,122,1,SETANG,180,CROSS,FIN
44 V=TURN / TOOL,121,2,SETANG,90,LONG,ROUGH
45 W=CONT / TOOL,342,3,SETANG,90,FIN
46 $$
47 $$ --- INSTRUcoes PARA USINAGEM ---
48 $$
49 CLAMP / 145,INVERS          $$ PRIMEIRA FIXACAO
50 CUTLOC / BEFORE
51 WORK / J,P
52 CUT / A,TO,B
53 WORK / V,W
54 CUT / B,TO,D
55 CLAMP / J                  $$ SEGUNDA FIXACAO
56 WORK / J,P
57 CUT / F,RE,E
58 WORK / V,W
59 CUT / E,RE,C
60 WORK / NOMORE
61 FINI

```

## FICHA PARA REGISTRO DE DADOS TECNOLÓGICOS DE USINAGEM

## Grupo de dados 10: Identificação - Classificação

COD. DO MATERIAL								CT*	Gr.*	No*	DADOS ADICIONAIS
1-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48	49-56	57-64	-66	-68	-70	-72 73-80
2201								20	10	1	

## Grupo de dados 20: Dados do material

COD. DO MATERIAL	DESIGN. DO MATERIAL	K <sub>SI</sub> ( $\frac{N}{mm^2}$ )	1-Z	LIM. RESIST. ( $\frac{N}{mm^2}$ )							
1-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48	49-56	57-64	-66	-68	-70	-72 73-80
2201	FC-100	664	0.75	79				20	20	1	

## Grupo de dados 30: Dados gerais da ferramenta - Torneamento

COD. DO MATERIAL	COD. DA FERRAM.	DESIGN. DA FERRAM.	$a_{min} (\frac{m}{min})$	$v_{max} (\frac{m}{min})$	$v_{max} (\frac{m}{min})$	$v_{min} (\frac{m}{min})$	FLUIDO DE CORTE				
1-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48	49-56	57-64	-66	-68	-70	-72 73-80
2201	310	K10	1.0	200	350	140	0.0	20	30	1	

## Grupo de dados 40: Dados para o cálculo dos valores de corte - Torneamento

COD. DO MATERIAL	COD. DA FERRAM.	V STAND	E CONST	F CONST	G CONST	H CONST					
1-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48	49-56	57-64	-66	-68	-70	-72 73-80
2201	310	529.11	-0.1807	-0.1440	-0.1994	0.2992		20	40	1	

## Grupo de dados 50: Dados para o cálculo do avanço - Torneamento

COD. DO MATERIAL	COD. DA FERRAM.	B <sub>1</sub> mm	H <sub>1</sub> ( $\frac{mm}{rot}$ )	B <sub>2</sub> mm	H <sub>2</sub> ( $\frac{mm}{rot}$ )	B <sub>3</sub> mm	H <sub>3</sub> ( $\frac{mm}{rot}$ )				
1-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48	49-56	57-64	-66	-68	-70	-72 73-80
2201	310	0.0	0.0	2.59	0.24	3.62	0.39	20	50	1	
		B <sub>4</sub>	H <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	H <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	H <sub>6</sub>				
2201	310	5.18	0.48					20	50	2	
		B <sub>7</sub>	H <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>	H <sub>8</sub>	B <sub>9</sub>	H <sub>9</sub>				
								20	50	3	
		B <sub>10</sub>	H <sub>10</sub>	B <sub>11</sub>	H <sub>11</sub>	B <sub>12</sub>	H <sub>12</sub>				
								20	50	4	

## Grupo de dados 51: Dados para correção do avanço - Torneamento

COD. DO MATERIAL	COD. DA FERRAM.	CROSSK	RKAPK	FINK							
1-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48	49-56	57-64	-66	-68	-70	-72 73-80
2201	310	100	0.5	100				20	51	1	

\* CT : Tipo de arquivo

Gr. : Nº do grupo de dados

No : Nº da linha no grupo de dados

## FICHA PARA REGISTRO DE DADOS DE MÁQUINAS - FERRAMENTAS

## Grupo de dados 10: Dados gerais

	PP NOME	HARDWARE NOME		UNID.	CT	Gr.	No.	DADOS ADICIONAIS
1-2	3-8	9-20	21-65	66	-68	-70	-72	73-80
	CSEPEL	BOSCH-NC803		0.0	30	20	1	

## Grupo de dados 20: Precisão da máquina e controle

	PP NOME	CORREÇÃO DA RUGOSIDADE		CT	Gr.	No.	DADOS ADICIONAIS
1-2	3-8	9-16	17-66	-68	-70	-72	73-80
	CSEPEL	1		30	30	1	

## Grupo de dados 30: Acionamento da árvore, dados gerais

	PP NOME	Nº DE CAMPOS DE ROTAÇÃO	TROCA DE CAMPO	TIPO DE ACIONAM.	P%		CT	Gr.	No.	DADOS ADICIONAIS
1-2	3-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-66	-68	-70	-72	73-80
	CSEPEL	3	0.0	1.0	10.0		30	30	1	

## Grupo de dados 31: Rotações disponíveis

	PP NOME	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	n <sub>4</sub>	n <sub>5</sub>	n <sub>6</sub>	n <sub>7</sub>		CT	Gr.	No.	DADOS ADICIONAIS
1-2	3-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48	49-56	57-64	65-66	-68	-70	-72	73-80
	CSEPEL	63	90	125	180	250	355	500		30	31	1	
	CSEPEL	710	1000	1400						30	31	1	

## Grupo de dados 32: Limitação do campo de rotações

	PP NOME	Nº DO CAMPO DE ROTAÇÃO	n <sub>min</sub>	n <sub>k</sub>	n <sub>max</sub>		CT	Gr.	No.	DADOS ADICIONAIS
1-2	3-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-66	-68	-70	-72	73-80
	CSEPEL	1	63	90	710		30	33	1	

## Grupo de dados 33: Torques do campo de rotações

	PP NOME	Nº DO CAMPO DE ROTAÇÃO	M=CONST.	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>		CT	Gr.	No.	DADOS ADICIONAIS
1-2	3-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48	49-56	57-64	65-66	-68	-70	-72	73-80
	CSEPEL	1	1288	955	993	690	430	260		30	33	1	
	CSEPEL	2	248	175						30	33	2	

MÁXIMO 10 X

## Grupo de dados 32: Limitação do campo de rotações

	PP NOME	Nº DO CAMPO DE ROTAÇÃO	n <sub>min</sub>	n <sub>k</sub>	n <sub>max</sub>		CT	Gr.	No.	DADOS ADICIONAIS
	CSEPEL	2	125	135	1400		30	33	1	

## Grupo de dados 33: Torques do campo de rotações

	PP NOME	Nº DO CAMPO DE ROTAÇÃO	M=CONST.	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>		CT	Gr.	No.	DADOS ADICIONAIS
1-2	3-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48	49-56	57-64	65-66	-68	-70	-72	73-80
	CSEPEL	2	649	477	497	350	310	135		30	33	1	
	CSEPEL	2	124	89						30	33	2	

## Grupo de dados 40: Informações sobre o acionamento do avanço

	PP NOME	TIPO DE ACIONAMEN.	UNID. DO AVANÇO	S <sub>min</sub>	S <sub>max</sub> TRANS.	S <sub>max</sub> LONGIT.	PROGRES. DO AVAN.		CT	Gr.	No.	DADOS ADICIONAIS
	CSEPEL	1	1	0.1	2000	2000	0.01		30	40	1	









## DADOS ARMAZENADOS NO ARQUIVO DE DADOS TECNOLÓGICOS DE USINAGEM

WS-SCHL.	KS1.1	1-Z	ZUGFK.
2201.	664.000	0.750	79.000

		SCHN.CODE 310	SCHN.CODE 315
AMINR	I	0.1000	0.1000
VMAXR	I	200.0000	200.0000
VMAXF	I	250.0000	250.0000
VKIN	I	140.0000	140.0000
KUEHLM	I	0.0	0.0
VSTAND	I	529.1100	529.1100
ECONST	I	-0.1807	-0.1807
FCONST	I	-0.1440	-0.1440
GCONST	I	-0.1994	-0.1994
HCONST	I	0.2992	0.2992
B1	I	0.0	0.0
H1	I	0.0	0.0
B2	I	2.5900	2.5900
H2	I	0.2400	0.2400
B3	I	3.6200	3.6200
H3	I	0.3900	0.3900
B4	I	5.1800	5.1800
H4	I	0.4800	0.4800
CROSSK	I	100.0000	100.0000
RKAPK	I	0.5000	0.5000
FINK	I	100.0000	100.0000

DADOS ARMAZENADOS NO ARQUIVO DE DADOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

MASCHINENNAME  
CSEPEL

ARBEITSSPINDEL-HAUPTANTRIEB

UNIT	RT.KORR.	ANZ.BR.	BER.WECHS.	ANTR.GEST	PROZ.
0.0	1.0000	2.0000	0.0	1.0000	10.0000

ANGABEN ZUM VORSCHUBANTRIEB

ANTR.GEST	VORS.DIM	S MIN	S MAX PLAN	S MAX LAENG	STUF.SPR
0.0	1.0000	0.1000	2000.0000	2000.0000	0.0100

SCHALTBARE DREHZAHLEN

63.0000	90.0000	125.0000	180.0000	250.0000	355.0000	500.0000
710.0000	1000.0000	1400.0000				

DRZ.BER.NR	N MIN	NK	N MAX
1.0000	63.0000	63.0000	710.0000

DREHMOMENTE DES DREHZAHLBEREICHES

1288.0000	955.0000	993.0000	690.0000	420.0000	269.0000
248.0000	175.0000				

DRZ.BER.NR	N MIN	NK	N MAX
2.0000	125.0000	125.0000	1400.0000

DREHMOMENTE DES DREHZAHLBEREICHES

649.0000	477.0000	497.0000	350.0000	210.0000	135.0000
124.0000	89.0000				

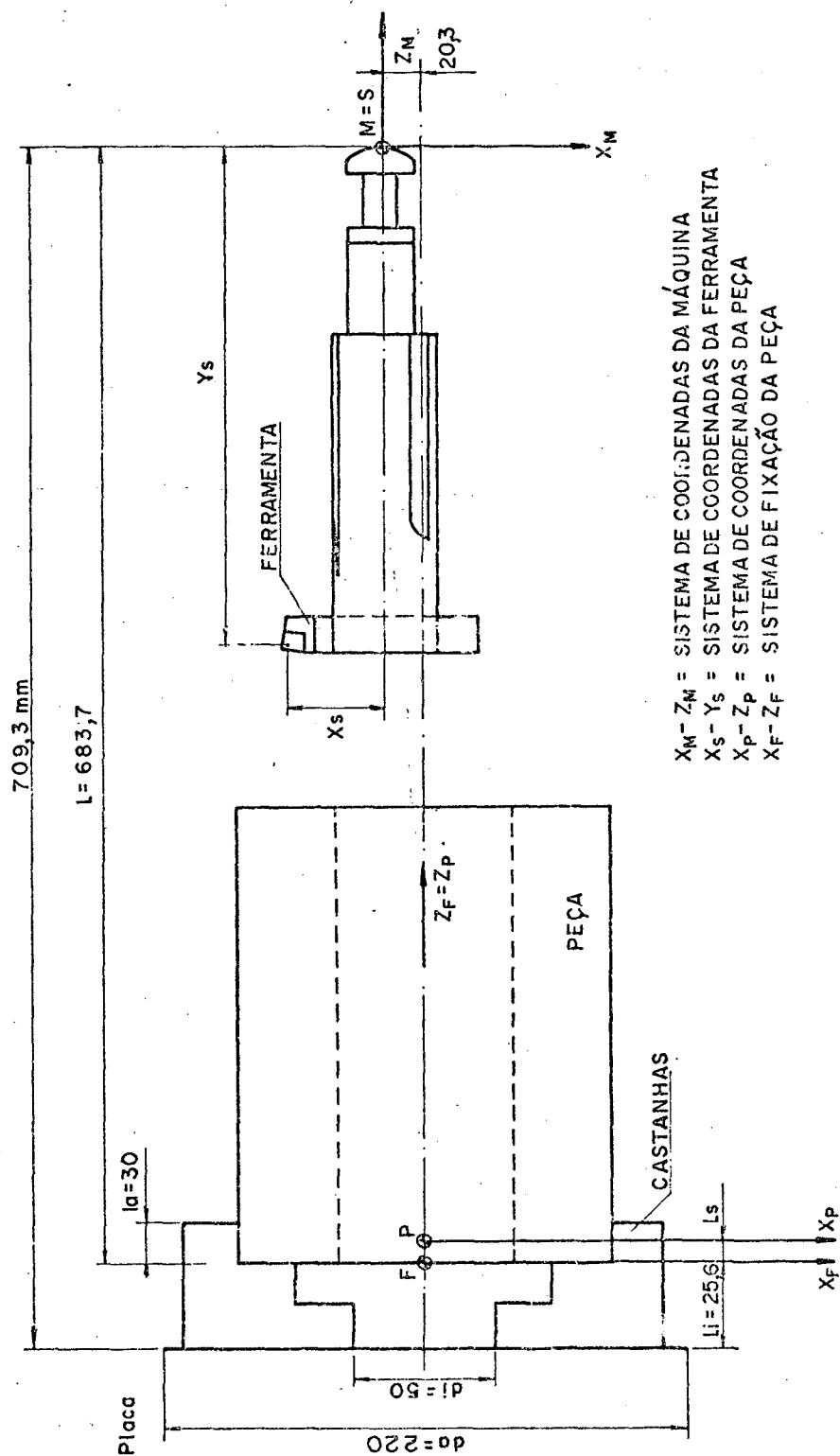
# DADOS ARMAZENADOS NO ARQUIVO DE DADOS DE MATERIAIS DE FERRAMENTAS E FERRAMENTAS

```

*****
* BEZ.   * 1.WERKZ* 2.WERKZ* 3.WERKZ* 4.WERKZ* 5.WERKZ*
*****
*IDENTNUMMER
*****
* WZ-NR * 121. * 122. * 123. * 215. * 342. *
* SCHAFT * 0 * 0 * 0 * 0 * 0 *
*****
*SYSTEMNUMMER
*****
*FERTV. * 4 * 4 * 4 * 4 * 4 *
*SCHND. * 12 * 12 * 12 * 21 * 24 *
* SCHAFT * 1 * 1 * 1 * 4 * 5 *
* SCH.ST * 310 * 310 * 310 * 310 * 310 *
* SPANNM * 0 * 0 * 0 * 0 * 0 *
* EINSPI. * 0 * 0 * 0 * 0 * 0 *
*****
*EINSATZBEDING.
*****
*AMINRL * 1.000 * 1.000 * 1.000 * 1.000 * 1.000 *
* B/HREL * 1.000 * 1.000 * 1.000 * 1.000 * 1.000 *
* HZUL * 0.500 * 0.500 * 0.500 * 0.500 * 0.300 *
* BZUL * 5.000 * 5.000 * 5.000 * 5.000 * 5.000 *
* PZUL * 1250.000 * 1000.000 * 1250.000 * 1250.000 * 750.000 *
* VB * 0.300 * 0.300 * 0.300 * 0.300 * 0.300 *
* TZUL * 20.000 * 20.000 * 20.000 * 20.000 * 20.000 *
* HMIN * 0.100 * 0.100 * 0.100 * 0.100 * 0.100 *
*****
*WINKELANGABEN
*****
* PSI * -15.000 * -15.000 * -15.000 * -105.000 * 3.000 *
* TAU * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 *
* EPS * 90.000 * 90.000 * 90.000 * 90.000 * 55.000 *
* ETA * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 *
*****
*ABMESSUNGEN
*****
* XS * 53.000 * 348.000 * 350.000 * 308.000 * 54.000 *
* YS * 431.000 * 32.000 * 30.000 * -37.000 * 342.000 *
* RS * 0.800 * 0.800 * 0.800 * 0.800 * 0.800 *
* I * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 *
* TMAX * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 *
* DMIN * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 * 0.0 *
* E * 3.000 * 3.000 * 3.000 * 22.000 * 0.800 *
* L1 * 110.000 * 124.000 * 110.000 * 21.000 * 125.000 *
* E1 * 3.000 * 3.000 * 3.000 * 72.000 * 1.000 *
* F * 16.000 * 21.000 * 14.000 * 0.800 * 25.000 *
* L2 * 17.000 * 23.000 * 30.000 * 125.000 * 19.000 *
* F1 * 16.000 * 64.000 * 65.000 * 1.000 * 25.000 *
* G * 0.800 * 0.800 * 0.800 * 3.300 * 0.800 *
* KA * 424.500 * 21.000 * 16.000 * -25.000 * 327.000 *
* B * 19.000 * 20.000 * 19.000 * 20.000 * 20.000 *
* H * 19.000 * 20.000 * 19.000 * 20.000 * 20.000 *
*****
* UNITS * 0 * 0 * 0 * 0 * 0 *
*****

```

# SISTEMAS DE COORDENADAS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE CONFEÇÃO DA PEÇA



$X_M - Z_M$  = SISTEMA DE COORDENADAS DA MÁQUINA  
 $X_S - Y_S$  = SISTEMA DE COORDENADAS DA FERRAMENTA  
 $X_P - Z_P$  = SISTEMA DE COORDENADAS DA PEÇA  
 $X_F - Z_F$  = SISTEMA DE FIXAÇÃO DA PEÇA

## RESULTADO DO PROCESSAMENTO

PEÇA TESTE P/ USO DOS ARQUIVOS DO EXAPT2

## OUTPUT " DO PROCESSAMENTO

[illegible]







159	30	BLANCO	2.	32.80000	65.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0
160	30	BLANCO	2.	109.45299	65.00000	0.0	0.0	-0.86603	0.0	0.0	0.0
161	30	BLANCO	2.	119.76906	45.40000	1.25000	120.46188	45.80000	0.0	0.0	0.0
162	30	BLANCO	2.	120.46188	45.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0
163	30	BLANCO	2.	145.00000	45.00000	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0	0.0
164	1	CARDNO	55.								
165	2	CAMP	1051.								
166	30	BLANCI	1.		0.	11.	145.00000	76.80000	0.00000	30.00000	0.0
167	30	BLANCO	2.	0.00000	39.00000	0.0	1.00000	0.0	0.0	0.0	0.0
168	30	BLANCO	2.	0.00000	45.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0
169	30	BLANCO	2.	24.53812	45.00000	1.25000	24.53812	45.80000	0.0	0.0	0.0
170	30	BLANCO	2.	25.23094	45.40000	0.0	0.86603	-0.50000	0.0	0.0	0.0
171	30	BLANCO	2.	36.54701	65.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0
172	30	BLANCO	2.	112.20000	65.00000	1.25000	112.20000	65.80000	0.0	0.0	0.0
173	30	BLANCO	2.	113.00000	65.80000	0.0	1.00000	0.0	0.0	0.0	0.0
174	30	BLANCO	2.	113.00000	70.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0
175	30	BLANCO	2.	145.00000	70.00000	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0	0.0
176	30	BLANCO	2.	145.00000	30.00000	0.0	0.0	1.00000	0.0	0.0	0.0
177	30	BLANCO	2.	0.00000	30.00000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
178	30	PARICI	3.		0.	11.	140.00000	55.00000	0.0	30.00000	0.0
179	30	PARICI	4.	0.0	30.00000	0.0	1.00000	0.0	3222.		3222.
180	30	PARICI	4.	0.0	45.00000	0.0	0.0	-1.00000	3222.		3222.
181	30	PARICI	4.	25.00000	45.00000	0.0	0.86603	-0.50000	3222.		3222.
182	30	PARICI	4.	36.54701	65.00000	0.0	0.0	-1.00000	3222.		3222.
183	30	PARICI	4.	70.00000	65.00000	0.0	-1.00000	0.0	3222.		3222.
184	30	PARICI	4.	75.00000	55.00000	0.20000	75.00000	55.00000	3222.		3222.
185	30	PARICI	4.	90.00000	50.00000	0.0	0.0	-1.00000	3222.		3222.
186	30	PARICI	4.	100.00000	50.00000	0.0	-0.70711	-0.70711	3222.		3222.
187	30	PARICI	4.	140.00000	40.00000	0.0	0.0	-1.00000	3222.		3222.
188	30	PARICI	4.	140.00000	40.00000	0.0	-1.00000	0.0	3222.		3222.
189	30	PARICI	4.	140.00000	30.00000	0.0	0.0	1.00000	3222.		3222.
190	1	CARDNO	55.								
191	2	YOLRU	1025.	1.00000	1.00000						
192	2	STAY	1083.	180.00000							
193	1	CARDNO	57.								
194	2	RAPID	1031.	710.00000	59.	145.	1.00000	0.0			
195	2	SPINDL	5.		0.	495.80000	5.94235	0.0			
196	5	GJTB	5.		0.	489.80000	5.94235	0.0			
197	5	GJTB	5.								
198	2	FEDRAT	1009.	0.42741							
199	5	GJTB	5.		0.	489.80000	-3.40000	0.0			
200	2	SPINDL	1031.	355.00000	59.	145.	1.00000	0.0			
201	5	GJTB	5.		0.	489.80000	-38.90000	0.0			
202	2	RAPID	5.								
203	2	SPINDL	1031.	1000.00000	59.	145.	2.00000	0.0			
204	5	GJTB	5.		0.	495.80000	-38.80000	0.0			
205	30	BLANCI	1.		0.	16.	141.00000	70.00000	0.00000	30.00000	0.0
206	30	BLANCO	2.	141.00000	70.00000	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0	0.0
207	30	BLANCO	2.	141.00000	30.00000	0.0	0.0	1.00000	0.0	0.0	0.0
208	30	BLANCO	2.	0.00000	30.00000	0.0	1.00000	0.0	0.0	0.0	0.0
209	30	BLANCO	2.	0.00000	45.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0
210	30	BLANCO	2.	24.53812	45.00000	1.25000	24.53812	45.80000	0.0	0.0	0.0
211	30	BLANCO	2.	25.23094	45.40000	0.0	0.86603	-0.50000	0.0	0.0	0.0
212	30	BLANCO	2.	36.54701	65.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0
213	30	BLANCO	2.	112.20000	65.00000	1.25000	112.20000	65.80000	0.0	0.0	0.0
214	30	BLANCO	2.	113.00000	65.80000	0.0	1.00000	0.0	0.0	0.0	0.0
215	30	BLANCO	2.	113.00000	70.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0	0.0	0.0
216	5	GJTB	5.		0.	495.80000	5.13850	0.0			
217	5	GJTB	5.		0.	489.80000	5.13850	0.0			
218	2	FEDRAT	1003.	0.32000							





337	5	3373	5.		0.	412.99593	-319.80000	0.0	
338	2	RAPID	5.						
339	2	SPINDL	1031.	710.00000	59.	145.	1.00000	0.0	
340	5	3373	5.		0.	412.99593	-121.80000	0.0	
341	5	3373	5.		0.	484.80000	-121.80000	0.0	
342	5	3373	5.		0.	484.80000	-94.80000	0.0	
343	2	FEDRAT	1009.	0.32000	0.	442.33137	-94.80000	0.0	
344	5	3373	5.		0.	432.33137	-104.80000	0.0	
345	5	3373	5.		59.	145.	1.00000	0.0	
346	2	SPINDL	1031.	500.00000	0.	417.00000	-104.80000	0.0	417.00000 -109.00000
347	5	3373	5.		4.	9.00000		0.0	
348	3	SJRFAC	2.	0.0	0.0	0.0	1.00000	4.20000	
					0.	412.80000	-109.00000	0.0	
					0.	412.80000	-119.80000	0.0	
349	5	3373	5.		0.	412.80000	-121.80000	0.0	
350	5	3373	5.		0.	13.	140.00000	55.00000	30.00000
351	2	RAPID	5.			0.0	0.0	-1.00000	0.0
352	5	3373	5.		65.00000	0.0	-1.00000	0.0	
353	30	BLANCO	1.	36.54701	65.00000	0.0	0.0	55.00000	0.0
354	30	BLANCO	2.	70.00000	65.00000	0.0	75.00000	55.00000	0.0
355	30	BLANCO	2.	70.00000	55.00000	0.20000	0.0	-1.00000	0.0
356	30	BLANCO	2.	75.00000	50.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0
357	30	BLANCO	2.	75.00000	50.00000	0.0	0.0	-0.70711	0.0
358	30	BLANCO	2.	90.00000	50.00000	0.0	-0.70711	40.80000	0.0
359	30	BLANCO	2.	99.76569	40.23431	1.25000	100.33137	-1.00000	0.0
360	30	BLANCO	2.	100.33137	40.00000	0.0	0.0	0.0	0.0
361	30	BLANCO	2.	140.00000	40.00000	0.0	-1.00000	0.0	0.0
362	30	BLANCO	2.	140.00000	30.00000	0.0	0.0	1.00000	0.0
363	30	BLANCO	2.	0.00000	30.00000	0.0	1.00000	0.0	0.0
364	30	BLANCO	2.	0.00000	45.00000	0.0	0.0	-1.00000	0.0
365	30	BLANCO	2.	24.53812	45.00000	1.25000	24.53812	45.80000	0.0
366	30	BLANCO	2.	25.23094	45.40000	0.0	0.86603	-0.50000	0.0
367	1	CARDNO	61.						
368	14	FINI							

END OF CLTAPE

\*\*\* 368 RECORDS OF CLDATA COPIED

RESULTADO DO PÓS-PROCESSAMENTO

( PECA TESTE P/ USO DOS ARQUIVOS DO EXAPT2 -- SEGUNDA FIXACAO )  
 N001G92G60X117002335700 N056500X67800  
 N002701000M06 N057276936  
 N003G90G643X250562147800S15M03 N059X54360  
 N0042141800 N059501X5655274812  
 N005G01X33400F20346 N05002X567392709814182K382  
 N006X70800S13 N061001X55800  
 N007G002147300S16 N06200X57800S15  
 N008X26860 N0632142800  
 N0092140800 N06440800  
 N010G01X35400F32030 N06501210333222720  
 N011X70800S14 N066X500379332  
 N012G002143800 N06774000S14  
 N013G92540X733002252700 N06802X5400027080014200K0  
 N014702000M06 N06901X55800  
 N015G0543X727982144164S13 N07000X67800  
 N016X65970 N071640X-2033001709330M05  
 N017G012112200F16963 N072X30

( PECA TESTE P/ USO DOS ARQUIVOS DO EXAPT2 -- PRIMEIRA FIXACAO )  
 N001G92X117002335700  
 N002701000M06  
 N003G90G643X260562152800S15M03  
 N0042141800  
 N005G01X33400F20346  
 N006X70800S13  
 N007G002147300S16  
 N008X26860  
 N0092140800  
 N010G01X35400F32030  
 N011X70800S14  
 N012G002143800  
 N013G92540X733002252700  
 N014702000M06  
 N015G0543X727982144164S13  
 N016X65970  
 N017G012112200F16963  
 N018X667982109492F22542  
 N019238072F15173  
 N020G00X58798239606  
 N0212145154  
 N022X61140  
 N023G012112760F16963  
 N024X659702109970=22542  
 N025G00X55970211170214  
 N0262149164  
 N027X55310  
 N028G012115548F23991  
 N029X611402112760F31749  
 N030G00X63140211492  
 N0312149144  
 N032X51550  
 N033G017118294F23365  
 N034X563102115548F31749  
 N035G00X573102117280  
 N0362149144  
 N037X65798  
 N038G012121038F23365  
 N039X51554211234F31749  
 N040G00X525542120025  
 N041X72798  
 N042392540X743002341700  
 N043103100M05  
 N044X68816  
 N045G00X543X72800239502  
 N046501X68330237670F15000  
 N04732930  
 N048X70800  
 N049G00234930S15  
 N0502147800  
 N051X45200  
 N052G012120452F22720  
 N053X658002108914S16  
 N054728200  
 N055X70800  
 N056G00234800  
 N057X72800  
 N058M05  
 N059M00

## APÊNDICE IV

## DADOS DA AFERIÇÃO DOS AVANÇOS

Valor teórico, VT** (mm/rot)	Valor medido, VM** / 10 voltas da árvore. (mm/volta)											
	Posição P1***				Posição P2***				Posição P3***			
	Medidas		Média	Medidas		Média	Medidas		Média	Medidas		Média
0,2 (0,5)*	0,1970	0,1970	0,1970	0,1970	0,1960	0,1950	0,1970	0,1960	0,1970	0,1970	0,1975	0,1972
0,3 (0,75)*	0,2995	0,2985	0,2980	0,2987	0,2985	0,2980	0,2980	0,2982	0,3000	0,3000	0,2990	0,2997
0,4 (1,0)*	0,3980	0,3990	0,3990	0,3987	0,3975	0,3980	0,3980	0,3978	0,3990	0,3990	0,4000	0,3993
0,5 (1,25)*	0,4975	0,4985	0,4990	0,4983	0,4960	0,4970	0,4960	0,4963	0,4980	0,4985	0,4990	0,4985
0,6 (1,50)*	0,5980	0,5980	0,5985	0,5982	0,5960	0,5970	0,5965	0,5965	0,5980	0,5980	0,5990	0,5985
0,75 (1,875)*	0,7400	0,7390	0,7380	0,7390	0,7410	0,7360	0,7360	0,7377	0,7400	0,7385	0,7390	0,7392

\* entre parênteses: valores indicados no torno; são equivalentes ao valor teórico do avanço multiplicado pelo fator 2,5, devido a relação de transmissão das engrenagens.

\*\* ver equação 14

\*\*\* ver figura 14

Valor teórico, VT (mm/rot)	Erro Relativo, ER * (%)		
	Posição P1	Posição P2	Posição P3
0,2	- 1,50	- 2,00	- 1,42
0,3	- 0,44	- 0,61	- 0,11
0,4	- 0,33	- 0,54	- 0,17
0,5	- 0,33	- 0,73	- 0,30
0,6	- 0,31	- 0,58	- 0,25
0,75	- 1,47	- 1,64	- 1,44

\* ver equação 14



## DADOS DA AFERIÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE CORTE

Valor teórico, VT* (mm)	Valor Medido, VM* (mm)											
	Posição P4 **				Posição P5 **				Posição P6 **			
	Medidas			Média	Medidas			Média	Medidas			Média
1,00	1,00	1,00	1,01	1,003	1,00	1,00	1,01	1,003	1,00	1,01	1,00	1,003
1,50	1,51	1,50	1,51	1,507	1,51	1,51	1,51	1,510	1,51	1,51	1,50	1,507
2,00	2,01	2,02	2,01	2,013	2,01	2,02	2,01	2,013	2,01	2,01	2,02	2,013
2,50	2,51	2,51	2,51	2,510	2,51	2,51	2,51	2,510	2,52	2,51	2,52	2,517
3,00	3,01	3,00	3,01	3,007	3,01	3,03	3,03	3,023	3,01	3,02	3,04	3,023
3,50	3,49	3,50	3,51	3,500	3,50	3,51	3,49	3,500	3,51	3,51	3,51	3,510
4,00	4,00	3,99	3,99	3,993	4,00	4,01	4,00	4,003	4,00	4,00	4,00	4,000
4,50	4,49	4,50	4,50	4,497	4,50	4,52	4,52	4,513	4,51	4,52	4,50	4,510
5,00	5,00	4,99	5,00	4,997	4,99	5,00	5,01	5,000	5,01	5,00	5,00	5,003
5,50	5,49	5,49	5,49	5,490	5,49	5,49	5,50	5,493	5,51	5,53	5,54	5,527
6,00	5,99	6,00	6,00	5,997	6,04	6,00	6,03	6,023	6,00	6,03	6,03	6,020
6,50	6,51	6,50	6,52	6,510	6,51	6,51	6,51	6,510	6,52	6,55	6,51	6,527
7,00	7,01	7,01	7,02	7,013	7,03	7,02	7,03	7,027	7,03	7,01	7,05	7,030

\* ver equação 14

\*\* ver figura 14

Valor teórico, VT (mm)	Erro Relativo, ER (%)		
	Posição P4	Posição P5	Posição P6
1,00	0,30	0,30	0,30
1,50	0,47	0,67	0,47
2,00	0,65	0,65	0,65
2,50	0,40	0,40	0,68
3,00	0,23	0,77	0,77
3,50	0,00	0,00	0,29
4,00	- 0,18	0,08	0,00
4,50	- 0,07	0,29	0,22
5,00	- 0,06	0,00	0,06
5,50	- 0,18	- 0,13	0,49
6,00	- 0,05	0,38	0,33
6,50	0,15	0,15	0,43
7,00	0,19	0,39	0,43

## DADOS DA AFERIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DAS ROTAÇÕES

Rotação indicada pela posição da alavanca seletora (RPM)	Voltagem de alimentação do motor (VOLTS)	Voltagem do multímetro (VOLTS)	Número de pulsos medidos a cada 10 segundos					Média do nº de pulsos	Desvio Padrão	Rotação correspondente (equação 15) (RPM)
53	300	0,14	71	71	71	70	71	70,8	0,45	28,32
53	340	0,17	82	83	82	82	82	82,2	0,45	32,88
53	380	0,19	91	91	92	92	92	91,6	0,55	36,64
75	300	0,21	101	101	101	101	101	101,0	0,00	40,40
75	340	0,24	114	114	114	114	114	114,0	0,00	45,60
75	380	0,27	127	127	127	127	127	127,0	0,00	50,80
112	300	0,32	150	150	150	149	150	149,8	0,45	59,60
112	340	0,37	171	171	171	171	171	171,0	0,00	68,40
112	380	0,42	193	194	194	194	194	193,8	0,45	77,52
160	300	0,47	216	216	216	216	216	216,0	0,00	86,40
160	340	0,54	246	247	247	247	247	246,8	0,45	98,72
160	380	0,61	278	278	278	278	277	277,8	0,45	111,12
224	300	0,67	304	305	305	305	304	304,6	0,55	121,84
224	340	0,77	349	349	349	350	349	349,2	0,45	139,68
224	380	0,86	389	389	389	389	389	389,0	0,00	155,60
335	300	1,00	451	452	452	451	451	451,4	0,55	180,56
335	340	1,15	518	518	518	519	518	518,2	0,45	207,28
335	380	1,30	583	585	583	583	584	583,6	0,89	233,44
475	300	1,45	651	651	652	651	651	651,2	0,45	260,48
475	340	1,65	740	740	740	741	741	740,4	0,55	296,16
475	380	1,85	827	828	827	828	827	827,4	0,55	330,96
670	300	2,05	916	917	917	917	918	917,0	0,71	366,80
670	340	2,33	1041	1041	1041	1041	1041	1041,0	0,00	416,40
670	380	2,60	1164	1163	1163	1164	1163	1163,4	0,55	465,36
1000	300	3,07	1366	1366	1366	1366	1367	1366,2	0,45	546,48
1000	340	3,50	1562	1564	1563	1563	1563	1563,0	0,71	625,20
1000	380	3,92	1749	1750	1750	1752	1750	1750,2	1,10	700,08

DADOS DA AFERIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DAS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM

Módulo	Escala	Posição da chave
Fs	$1 \times 10^2$	3,565
	$2 \times 10^2$	3,570
	$5 \times 10^2$	3,595
Fv	$1 \times 10^2$	9,100
	$2 \times 10^2$	9,060
	$5 \times 10^2$	9,150
Fr	$1 \times 10^2$	7,740
	$2 \times 10^2$	7,625

Posições da chave da sensibilidade do transdutor de sinais.

Valor teórico, VT* (N)	Valores medidos, VM* (N)				Erro Relativo ER* (%)
	Medidas			Média	
110	110	110	110	110	0,00
330	325	330	330	328	-0,51
550	550	550	550	550	0,00
770	765	770	770	768	-0,22
990	990	995	995	993	0,34

\* ver equação 14

Aferição de Fc, escala  $1 \times 10^2$ .

Valor teórico, VT (N)	Valores medidos, VM (N)				Erro Relativo ER (%)
	Medidas			Média	
220	220	220	220	220	0,00
440	440	440	440	440	0,00
660	660	660	660	660	0,00
880	880	890	880	883	0,38
1100	1100	1100	1100	1100	0,00
1320	1320	1320	1330	1323	0,25
1540	1540	1540	1550	1543	0,22
1760	1760	1770	1770	1767	0,38
1980	1990	1990	2000	1993	0,67

Aferição de  $F_c$ , escala  $2 \times 10^2$ .

Valor teórico, VT (N)	Valores medidos, VM (N)				Erro Relativo ER (%)
	Medidas			Média	
550	550	550	550	550	0,00
1100	1100	1100	1100	1100	0,00
1650	1650	1650	1650	1650	0,00
2200	2200	2200	2200	2200	0,00
2750	2750	2750	2750	2750	0,00
3300	3300	3300	3300	3300	0,00
3850	3850	3850	3850	3850	0,00
4400	4400	4400	4400	4400	0,00
4950	4950	4950	4950	4950	0,00

Aferição de  $F_c$ , escala  $5 \times 10^2$ .

Valor teórico, VT (N)	Valores medidos, VM (N)				Erro Relativo, ER (%)
	Medidas			Média	
110	110	110	110	110	0,00
330	330	330	330	330	0,00
550	550	550	550	550	0,00
770	770	770	770	770	0,00
990	990	990	990	990	0,00

Aferição de  $F_f$ , escala  $1 \times 10^2$ .

Valor teórico, VT (N)	Valores medidos, VM (N)				Erro Relativo, ER (%)
	Medidas			Média	
220	220	220	220	220	0,00
440	440	440	440	440	0,00
660	660	660	660	660	0,00
880	880	890	890	887	0,76
1100	1100	1100	1100	1100	0,00
1320	1320	1320	1320	1320	0,00
1540	1540	1540	1540	1540	0,00
1760	1760	1750	1760	1757	-0,19
1980	1980	1980	1980	1980	0,00

Aferição de  $F_f$ , escala  $2 \times 10^2$ .

Valor teórico, VT (N)	Valores medidos, VM (N)				Erro Relativo ER (%)
	Medidas			Média	
550	550	550	550	550	0,00
1100	1100	1100	1100	1100	0,00
1650	1650	1650	1650	1650	0,00
2200	2200	2200	2200	2200	0,00
2750	2750	2750	2750	2750	0,00
3300	3300	3300	3300	3300	0,00
3850	3850	3850	3850	3850	0,00
4400	4400	4400	4400	4400	0,00
4950	4950	4950	4950	4950	0,00

Aferição de  $F_f$ , escala  $5 \times 10^2$ .

Valor teórico, VT (N)	Valores medidos, VM (N)				Erro Relativo ER (%)
	Medidas			Média	
110	110	110	110	110	0,00
330	330	330	330	330	0,00
550	550	550	550	550	0,00
770	770	770	770	770	0,00
990	990	990	990	990	0,00

Aferição de  $F_r$ , escala  $1 \times 10^2$ .

Valor teórico, VT (N)	Valores medidos, VM (N)				Erro Relativo, ER (%)
	Medidas			Média	
220	220	220	220	220	0,00
440	440	450	440	443	0,76
660	660	660	660	660	0,00
880	880	890	890	887	0,76
1100	1100	1100	1100	1100	0,00
1320	1320	1320	1320	1320	0,00
1540	1540	1540	1540	1540	0,00
1760	1760	1760	1760	1760	0,00
1980	1980	1980	1980	1980	0,00

Aferição de Fr, escala  $2 \times 10^2$ .

DADOS DAS MEDIÇÕES DE DESGASTE DE FLANCO DA FERRAMENTA DE CORTE NO PRÉ -  
ENSAIO

Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Profundidade de corte (mm)	Tempo de usinagem (mm)	Desgaste de flanco (mm)
224	0,25	2,50	2,0	0,06
			4,0	0,12
			8,0	0,17
			12,5	0,21
			16,0	0,28
			20,0	0,33
			25,0	0,42
200	0,40	2,50	2,0	0,07
			4,0	0,10
			8,0	0,16
			12,5	0,22
			16,0	0,25
			20,0	0,30
			25,0	0,37
160	0,50	5,00	2,0	0,07
			4,0	0,11
			8,0	0,13
			12,5	0,15
			16,0	0,20
			20,0	0,23
			25,0	0,28



RESULTADOS DE FORÇA PRINCIPAL DE CORTE PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA ESPECÍFICA :

Avanço, $f$ (mm/rot)	Força principal de corte $F_c$ (N)	Desgaste de flanco atingido, $VB$ (mm)
0,1	314	0,07
0,1	294	0,02
0,16	441	0,04
0,16	465	0,03
0,25	583	0,04
0,25	591	0,04
0,25	549	0,05
0,4	853	0,04
0,4	798	0,04
0,4	693	0,05
0,63	1244	0,09
0,63	1209	0,09
0,63	1116	0,04
1,0	1738	0,08
1,0	1779	0,02

$v_c = 160$  m/min;  $a_p = 2,50$  mm;  $\gamma = -5^\circ$ ;  $\chi = 75^\circ$

## DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE TAYLOR EXPANDIDA.

Dados relativos ao material da peça e fatores de correção para o cálculo do avanço:

- identificação do material	FC-100
- número de código do material	2201
- limite de resistência à tração ( $N/mm^2$ )	79
- força específica de corte, $k_{cl.1}$ ( $N/mm^2$ )	664
- expoente da equação de Kienzle, $1-m_c$	0,75
- fator de correção para o cálculo do avanço em operações de acabamento (%)	100
- fator de correção para o cálculo do avanço em operações de faceamento (%)	100

Dados relativos ao material da ferramenta de corte:

- identificação da pastilha	K10
- número de código da pastilha	310
- profundidade de corte mínima em operações de desbaste (mm)	1,00
- velocidade de corte máxima em operações de desbaste (m/min)	200
- velocidade de corte máxima em operações de acabamento (m/min)	250
- velocidade de corte mínima (m/min)	140
- código de opção de utilização de fluido de corte	0

Dados de ensaio de vida de gume relativos ao desgaste de flanco da ferramenta para diferentes tempos de usinagem, com diversas combinações de condições de usinagem e ângulo de posição do gume principal de corte igual a  $75^\circ$ :

Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Profundidade de corte (mm)	Tempo de usinagem (min)	Desgaste de flanco (mm)
250	0,25	2,50	2	0,10
			4	0,15
			8	0,20
			12,5	0,28
			16	0,31
			20	0,40
			25	0,48
224	0,25	2,50	2	0,06
			4	0,11
			8	0,16
			12,5	0,20
			16	0,22
			20	0,25
			25	0,30
224	0,30	2,50	31,5	0,38
			40	0,53
			2	0,05
			4	0,13
			8	0,18
			12,5	0,22
			16	0,25
200	0,25	2,50	20	0,28
			25	0,30
			2	0,07
			4	0,08
			8	0,10
			12,5	0,16
			16	0,18
200	0,25	2,50	20	0,22
			25	0,27
			31,5	0,31
			40	0,38

## Continuação

Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Profundidade de corte (mm)	Tempo de usinagem (min)	Desgaste de flanco (mm)
200	0,40	2,50	2	0,06
			4	0,10
			8	0,13
			12,5	0,18
			16	0,21
			20	0,24
			25	0,26
			31,5	0,31
180	0,25	2,50	2	0,03
			4	0,06
			8	0,11
			12,5	0,14
			16	0,15
			20	0,19
			25	0,20
			31,5	0,23
180	0,30	2,50	40	0,25
			50	0,28
			2	0,04
			4	0,05
			8	0,08
			12,5	0,10
			16	0,11
			20	0,13
180	0,50	5,00	25	0,16
			31,5	0,18
			40	0,22
			50	0,26
			2	0,04
			4	0,07
			8	0,09
			12,5	0,14
180	0,50	5,00	16	0,17
			20	0,23
			25	0,25
			31,5	0,30

## Continuação

Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Profundidade de corte (mm)	Tempo de usinagem (min)	Desgaste de flanco (mm)
160	0,25	2,50	2	0,03
			4	0,05
			8	0,09
			12,5	0,10
			16	0,14
			20	0,17
			25	0,20
			31,5	0,23
			40	0,25
160	0,50	5,00	50	0,30
			2	0,07
			4	0,11
			8	0,13
			12,5	0,15
			16	0,20
			20	0,23
			25	0,28
			31,5	0,35
140	0,40	3,50	2	0,02
			4	0,03
			8	0,05
			12,5	0,08
			16	0,09
			20	0,11
			25	0,13
			31,5	0,15
			40	0,17
140	0,40	3,50	50	0,22